

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra obrábění a montáže**

**Návrh strategií obrábění tvarových ploch pro  
zvýšení produktivity**

**Proposal of Machining Strategy of Free Form  
Surface Milling to Increasing Productivity**

**Student:**

**Bc. Radek Martynek**

**Vedoucí diplomové práce:**

**Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

**Ostrava 2012**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Martynek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Návrh strategií obrábění tvarových ploch pro zvýšení produktivity**  
**Proposal of Machining Strategy of Free Form Surface Milling to**  
**Increasing Productivity**

Zásady pro vypracování:

1. Přehled strategií při frézování tvarových ploch.
2. Zhodnocení a rozbor obráběných ploch zadané součásti.
3. Aplikace navrhovaných strategií se zaměřením na kvalitu obrobeného povrchu a strojní čas.
4. Zhodnocení a rozbor dosažených výsledků návrhu.
5. Závěr pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. 256 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] SADÍLEK, M.; ČEP, R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 13-18 s. ISBN 80-214-3239-X.
- [4] SADÍLEK, M. Vyspělé strategie ve 3D frézování. *MM Průmyslové spektrum*, 2004, č. 12, 46-47 s. ISSN 1212-2572.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



  
doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literatury.

V Ostravě: 21.5. 2012



.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB- TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111 / 1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5. 2012



Plné jméno autora práce

Bc. Radek Martynek

Jablunkov 601

739 91 Jablunkov

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Marku Sadílkovi, Ph.D., za jeho cenné připomínky a rady. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy DYTRON s.r.o. a firmy SWA s.r.o. za poskytnutí informací a materiálů pro zpracování této diplomové práce.

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MARTYNEK, R. *Návrh strategií obrábění tvarových ploch pro zvýšení produktivity: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012, 59 s. Vedoucí práce: Ing. Sadílek, M., Ph.D.

Diplomová práce se zabývá návrhem strategií obrábění tvarových ploch pro zvýšení produktivity. Práce objasňuje vliv vhodně či nevhodně zvolené strategie obrábění tvarové plochy v CAD/CAM systému na reálných příkladech. Vhodný výběr strategie obrábění má obrovský vliv na kvalitu obroběných ploch, prodloužení životnosti nástroje, ale hlavně na snížení času obrábění, který je důležitý pro zvýšení produktivity. Ve druhé kapitole práce jsou prezentovány nejčastěji používané strategie pro dokončovací obrábění tvarových ploch. Třetí kapitola se věnuje zhodnocení a rozboru obráběných ploch dané součásti. V odborné práci jsou aplikovány vybrané strategie na zvolené tvarové plochy součásti tak, aby byla vždy dosažena požadovaná kvalita obráběné plochy. Celkové zhodnocení spočívá v porovnávání času obrábění u jednotlivých strategií a určení vhodných kombinací strategií při nejkratším čase obrábění, díky níž dosáhne maximální produktivity.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

MARTYNEK, R. *Proposal of Machining Strategy of Free Form Surface Milling to Increasing Productivity: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2012, 59 p. Thesis head: Ing. Sadílek, M., Ph.D.

This thesis describes proposals of machining strategy of free form surfaces milling to increasing productivity. Thesis explains the effect of appropriately or inappropriately selected machining strategy in CAD / CAM system on real examples. Appropriate selection of machining strategy has a huge impact on the quality of the machined surface, tool life, but mainly to reduce the machining time, which is important for increasing productivity. In the second chapter of the thesis presents the most commonly used strategies for finishing free form surfaces milling. In professional part strategies are applied to selected surfaces on the selected shape component so as to always achieve the required quality machined surfaces. The overall assessment is based on comparing the machining time the individual strategies and determine the appropriate combination of strategies in the shortest machining time, allowing to reach maximum productivity.

## OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK .....	9
0 ÚVOD .....	10
1 CÍLE .....	11
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU CAD FRÉZOVÁNÍ .....	12
2.1 Přehled dokončovacích operací programu Catia.....	13
2.1.1 3-osé dokončovací strategie .....	13
2.1.2 4-osé dokončovací strategie .....	15
2.1.3 5-osé dokončovací strategie .....	16
2.2 Strategie frézování při obrábění naklopeným nástrojem .....	19
3 ZHODNOCENÍ A ROZBOR OBRÁĚNÝCH PLOCH ZADANÉ SOUČÁSTI ..	22
4 REALIZACE EXPERIMENTU .....	25
4.1 Ověření použití vybraných strategií na tvarových plochách různými sklony.	26
4.2 Rozdělení ploch.....	28
4.3 Schéma experimentu .....	29
4.4 Výchozí tvar vyhrubované součásti .....	30
4.5 Opracování oblasti I. ....	30
4.6 Opracování oblasti II.....	36
4.7 Opracování oblasti III. ....	43
4.8 Opracování oblasti IV. ....	48
4.9 Opracování oblasti V.....	52
4.10 Zhodnocení prostředí CAD/CAM Catia .....	53
5 ZHODNOCENÍ A ROZBOR DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ NÁVRHU.....	54
5.1 Výsledný tvar po opracování .....	55
6 ZÁVĚR .....	56
7 LITERATURA.....	57
8 SEZNAM PŘÍLOH.....	59



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

Značení	Význam	Jednotka
CAD	počítačem podporovaný návrh	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
CIM	výroba integrovaná počítačem	[-]
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	[-]
D	obráběný průměr	[mm]
HSC	vysokorychlostní obrábění	[-]
HSM	vysokorychlostní frézování	[-]
NC	číslícově řízený	[-]
PC	personální počítač	[-]
PDM	systém pro správu obecných dat o výrobku	[-]
SH	parametr nastavené výšky nerovnosti	[mm]
Z	posuv ve směru osy nástroje	[mm]
$a_e$	šířka řezu	[mm]
$a_p$	hloubka řezu	[mm]
d	průměr frézy	[mm]
f	posuv	[mm×min <sup>-1</sup> ]
$f_0$	posuv na otáčku	[mm]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
$n$	otáčky frézy	[min <sup>-1</sup> ]
r	poloměr frézy	[mm]
$r_{eff}$	skutečný (efektivní) radius frézy	[mm]
$v_c$	řezná rychlost	[m×min <sup>-1</sup> ]
$v_{c,eff}$	skutečná (efektivní) řezná rychlost	[m×min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	rychlost posuvu	[mm×min <sup>-1</sup> ]
$\beta$	úhel nastavení nástroje	[°]

## 0 ÚVOD

Ve strojírenské praxi se stále ve větší míře při navrhování výrobku využívají tvarové plochy. V minulosti se tvarové plochy využívaly zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. S příchodem moderních CAD/CAM systémů se staly běžně používanými. Tato skutečnost vyvíjí neustálý nátlak na zdokonalování technickou přípravou výroby i samotné výrobní procesy. V dnešní době existuje mnoho systémů pro navrhování technologie zhotovení tvarových ploch. Tyto systémy nám nabízejí spoustu strategií při obrábění tvarových ploch.

Nasazení počítačově řízených obráběcích strojů je základním krokem. Důležitý je kvalifikovaný operátor stroje a osoba technologa programátora, který je schopen na základě CAM systému připravit kvalitní programy. Rychlost a kvalita zaškolení zmiňovaných pracovníků závisí také na zvoleném CAD/CAM systému. Tento systém má programátorovi usnadnit práci, proto by měl být uživatelský nenáročný, přehledný, snadno ovladatelný.

Aplikace CAD/CAM systému umožňuje přístup konstruktérovi při vývoji výrobků, kdy tvorba výrobku je komplexní proces konstruování, testování, korigování chyb, modifikování výroby.

Při obrábění složitých tvarových ploch je velmi důležité zvolit vhodnou strategii obrábění, kterou dosáhneme snížení času obrábění, zvýšení životnosti nástroje, zvýšení jakosti povrchu, ale také nám z velké míry ovlivní rozměrovou přesnost obrábění. Je zřejmé, že zvolená strategie má velký vliv na výsledky obrábění, jakost obrobku a tedy také na ekonomické aspekty výroby [1].

Současné CAD/CAM systémy nabízejí řadu funkcí a vylepšení, které přispívají ke zvyšování jakosti obrábění. Největšího pokroku je dosaženo v preferovaných oblastech, kam patří zejména výroba forem, zápusťek a jiných tvarově složitých součástí v různých odvětvích strojírenského průmyslu. Tato vylepšení zjednodušují práci technologa a zkracují čas tvorby programu i samotné výroby [1].

Diplomová práce bude zaměřená na aplikaci a použití různých strategií při obrábění tvarových ploch na reálné součásti. Výsledek by měl poukázat na časové rozdíly při používání odlišných strategií. Vhodné volby strategií dokážou zajistit kvalitu obrobené plochy, zkrátit výrobní časy, které jsou důležitým aspektem pro zvýšení produktivity.

## 1 CÍLE

Diplomová práce je zaměřená na problematiku návrhu strategií obrábění tvarových ploch pro zvýšení produktivity. Cílem diplomové práce je provedení experimentu, který je zaměřen na aplikaci navrhovaných strategií se zaměřením na kvalitu obrobeného povrchu a strojního času. Byla zadána součást obsahující více druhů tvarových ploch. Tvarové plochy byly rozděleny do oblastí, na každé oblasti byly aplikovány různé typy strategií, přičemž vždy musela být dodržena kvalita obrobené plochy.

V praxi je důležité při dokončovacím obrábění na čisto kulovou frézou nalezení optimálního kroku frézy pro požadovanou drsnost povrchu ve směru kolmém na posuv nástroje. Také je důležité-podstatné nalezení optimálního posuvu nástroje a optimální frézovací strategie. Po provedení experimentu je možné doporučit programátorovi strategii, které dokáže zkrátit výrobní čas a zkvalitnit jakost obráběného povrchu. [11]

### **Cílem diplomové práce je:**

- rozšíření dosavadních poznatků o technologiích využívajících CAD/CAM systémy,
- zhodnocení a porovnávání strategií obráběcích strategií tvarových ploch,
- nalezení optimální strategie frézování tvarových ploch,
- doporučení programátorovi CAD/CAM systému, která obráběcí strategie je nejvhodnější pro daný typ tvarové plochy,
- zkvalitnit výrobu ve společnostech, zabývajících se obráběním tvarových ploch,
- poukázat na konkrétních příkladech, že používáním vhodné obráběcí strategie, při dodržení stejné kvality povrchu, lze snížit čas obrábění a tím zvýšit produktivitu obrábění.

## **2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU CAD FRÉZOVÁNÍ**

V současné době je mnoho CAD/CAM systému, které mají různé obráběcí strategie, kdy každý z těchto systému může mít různé označení. V této práci byly vybrány obráběcí strategie z CAD/CAM systému CATIA V5R12. Z tohoto systému byl zvolen modul pro obrábění Surface Machining - 3 osé frézování a Multi-Axis Surface Machining – víceosé frézování.

### **Surface Machining – 3osé frézování:**

Tento produkt slouží hlavně pro obrábění tvarových a geometricky složitých součástí. Obsahuje úplné portfolio tříosých operací a pro úplnost a univerzálnost tohoto modulu byl tento produkt doplněn také některými 2,5-osými operacemi.

### **Multi-Axis Surface Machining – víceosé frézování:**

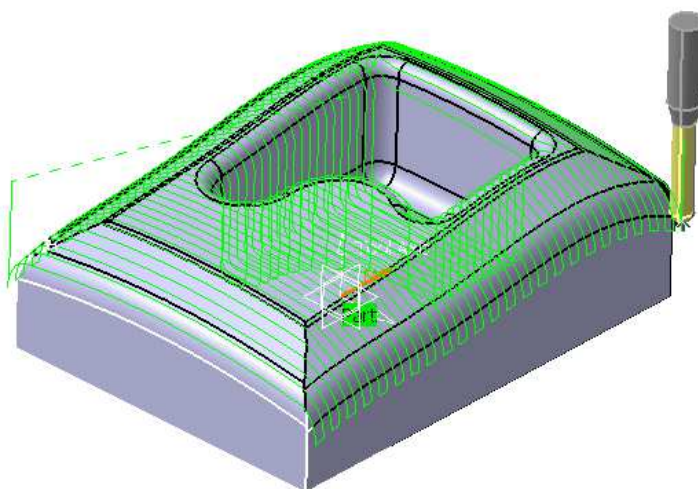
Tento modul se používá hlavně v případech, kdy nelze geometrii obrobit ve třech osách z důvodu nepřístupnosti obráběného tvaru nebo požadavku na velkou kvalitu výsledného povrchu.

## 2.1 Přehled dokončovacích operací programu Catia

### 2.1.1 3-osé dokončovací strategie

#### Operace Sweeping

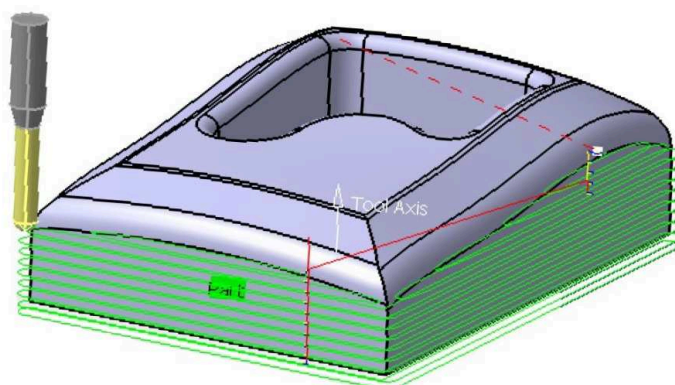
Operace Sweeping patří mezi nejpoužívanější dokončovací strategie. Dráhy této operace jsou řezy v rovině XZ nebo YZ, tyto dráhy zároveň kopírují konturu obráběné součásti ve směru osy Z nebo osy nástroje.



*Obr. 1 Operace Sweeping*

#### Operace Z-Level

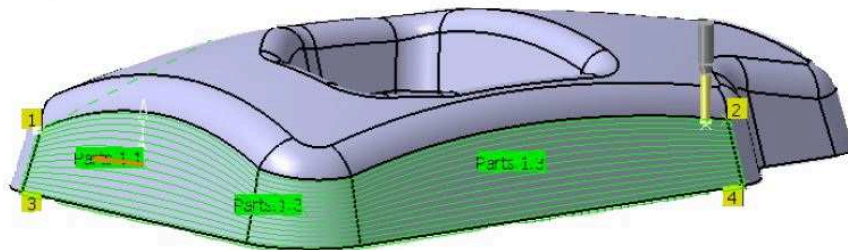
Z-Level je strategie pro obrábění strmých součástí, které lze ovlivnit úhlem naklonu nástroje. Dráhy této operace tvoří řez horizontální roviny o danou hodnotu v ose Z. Tato strategie je vhodná k dokončování a před-dokončování strmých ploch.



*Obr. 2 Operace Z-Level*

### Isoparametric machining

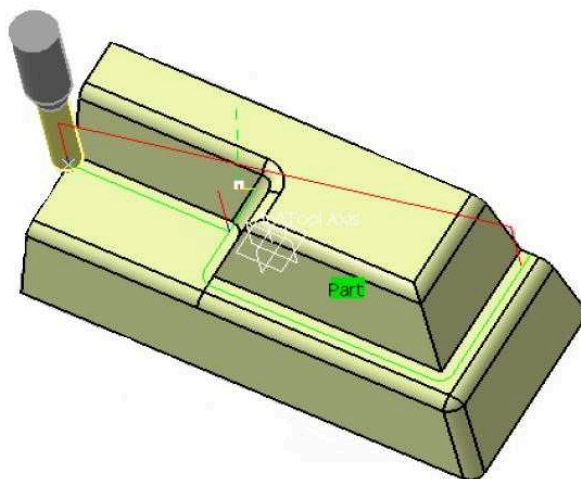
Isoparametric machining je strategie pro opracování jednotlivých, nebo vhodných skupin ploch v závislosti na směru ISO čar daných ploch. Strategie se často používá pro dokončování zaoblení a sražení hran.



*Obr. 3 Isoparametric machining*

### Operace Pencil

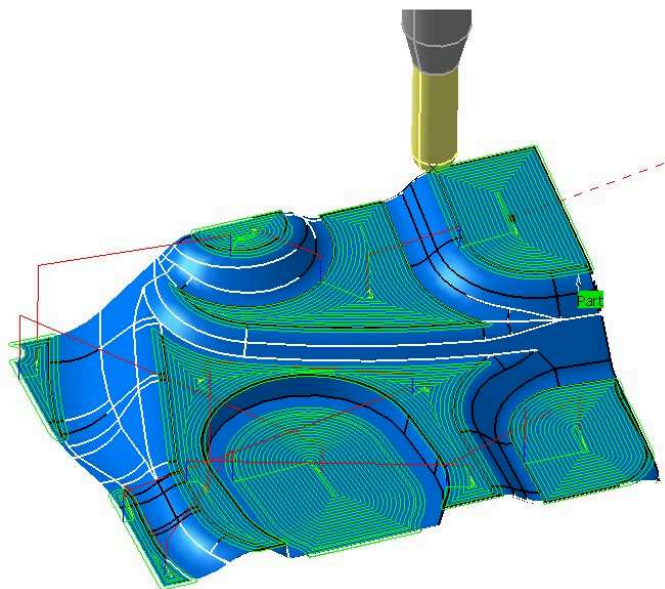
Operace Pencil se používá pro dokončování ploch, které nebyly dostatečně obrobena předcházejícími operacemi. Operace je vhodná k dobírání rohů nástrojem se shodným poloměrem nástroje.



*Obr. 4 Operace Pencil*

## Spiral Milling

Strategie Spiral Milling je určena výhradně pro rovinné plochy, ale lze jí také obrábět plochy mírně vykloněny od roviny, přibližně do  $5^\circ$ . Dráhy nástroje jsou ohraničeny hranicí rovinné plochy a kopírují tuto křivku s daným offsetem.

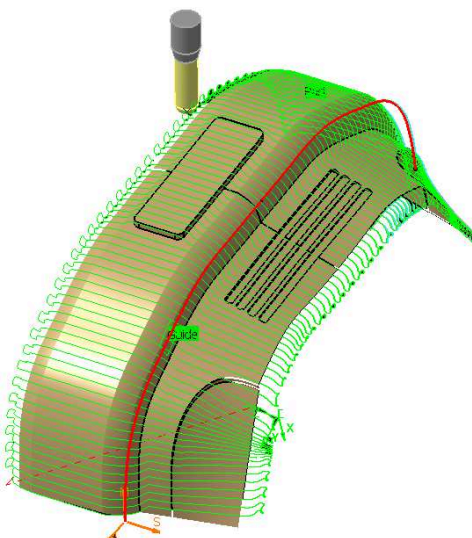


*Obr. 5 Spiral Milling*

### 2.1.2 4-osé dokončovací strategie

#### 4-Axis Curve Sweeping

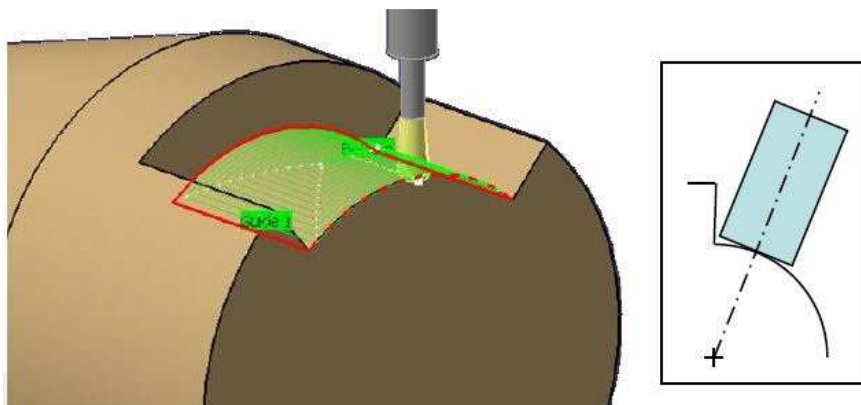
Strategie 4-Axis Curve Sweeping je v základu shodná se strategií Sweeping. Dráhy nástroje jsou řezy rovin s obráběnou plochou o určitou hodnotu, kde roviny jsou v normálové poloze na řídicí křivku.



*Obr. 6 4-Axis Curve Sweeping*

## 4-Axis Pocketing

Strategie 4-Axis Pocketing je vhodná pro obrábění jednoduchých tvarových ploch, kde poloha nástroje vzhledem k obráběné ploše je vždy normálová.

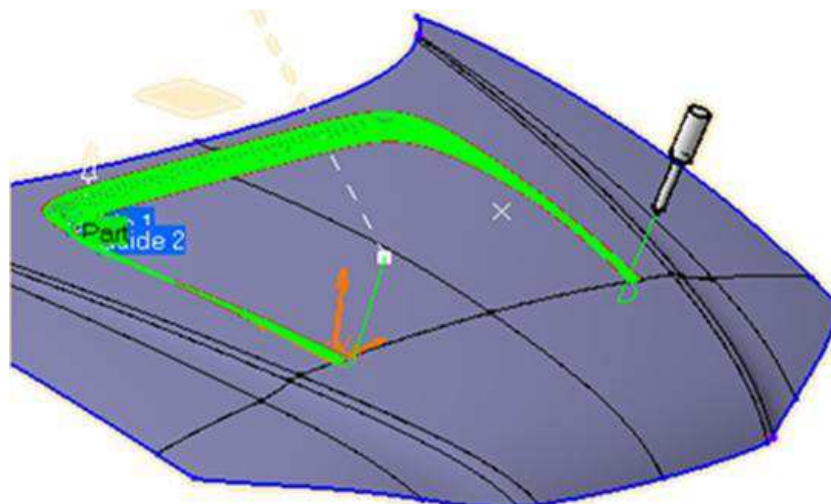


Obr. 7 4-Axis Pocketing

### 2.1.3 5-osé dokončovací strategie

#### Multi-Axis Sweeping

Tato strategie je velmi podobná jako strategie Sweeping s tím rozdílem, že si u nástroje lze zvolit úhel naklonění a ten zůstává konstantní ke všem tvarovým plochám.

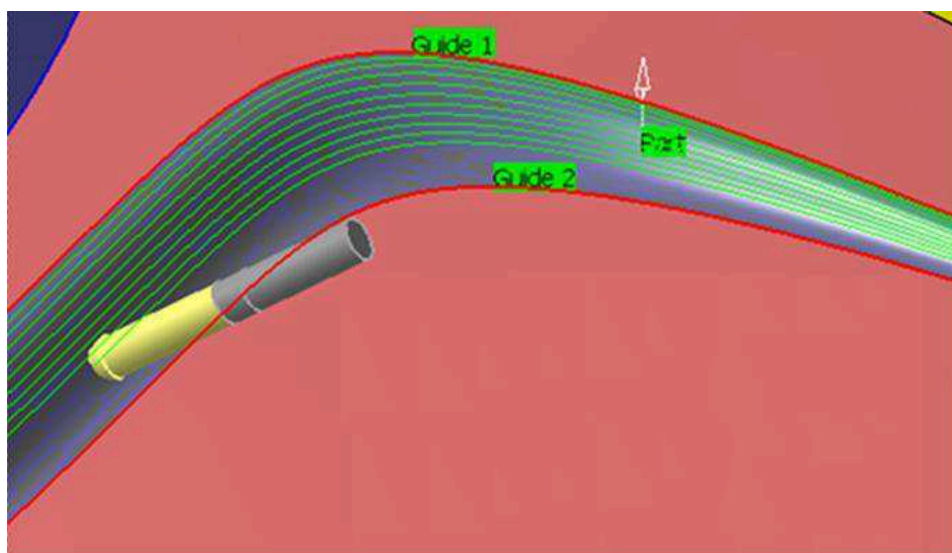


Obr. 8 Multi-Axis Sweeping



### Multi-Axis Contour Driven

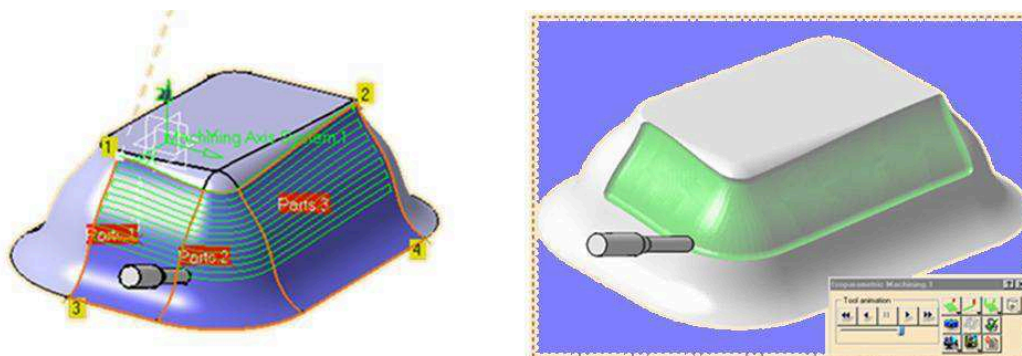
Strategie Multi-Axis Contour Driven se používá na jednotlivé tvarové plochy, které lze zadat dvěma řídicími křivkami, které nám určují hranice opracování. Dráhy nástroje jsou generovány z tvaru řídicích křivek. Nástroj lze nastavit tak, aby osa nástroje byla normálová vůči obráběné ploše, nebo nakloněná o daný úhel.



Obr. 9 Multi-Axis Contour Driven

### Multi-Axis Isoparametric

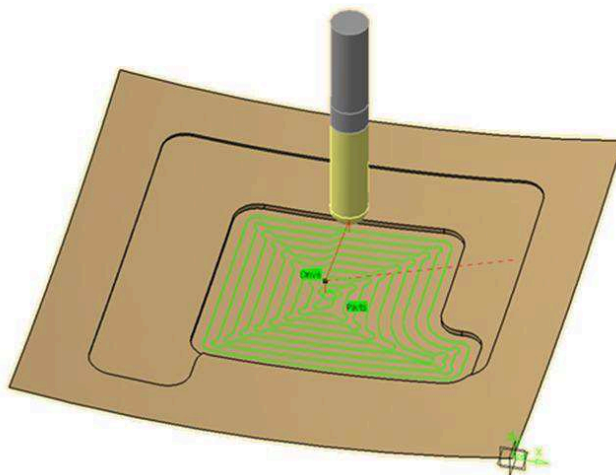
Strategie je obdobná jako Isoparametric machining strategie pro opracování jednotlivých nebo vhodných skupin ploch v závislosti na směru ISO čar daných ploch. Strategie se často používá pro dokončování zaoblení a sražení hran. Nástroj lze nastavit tak, aby osa nástroje byla normálová vůči obráběné ploše, nebo nakloněná o daný úhel.



Obr. 10 Multi-Axis Isoparametric

### Multi-Axis Spiral Milling

Je to obdoba strategie Spiral Milling, s tím rozdílem, že touto dokončovací operací lze obrábět nejen rovinné plochy, ale také prohnuté plochy do určitého úhlu. Na nástroji lze nastavit ideální polohu osy nástroje k obráběné ploše.

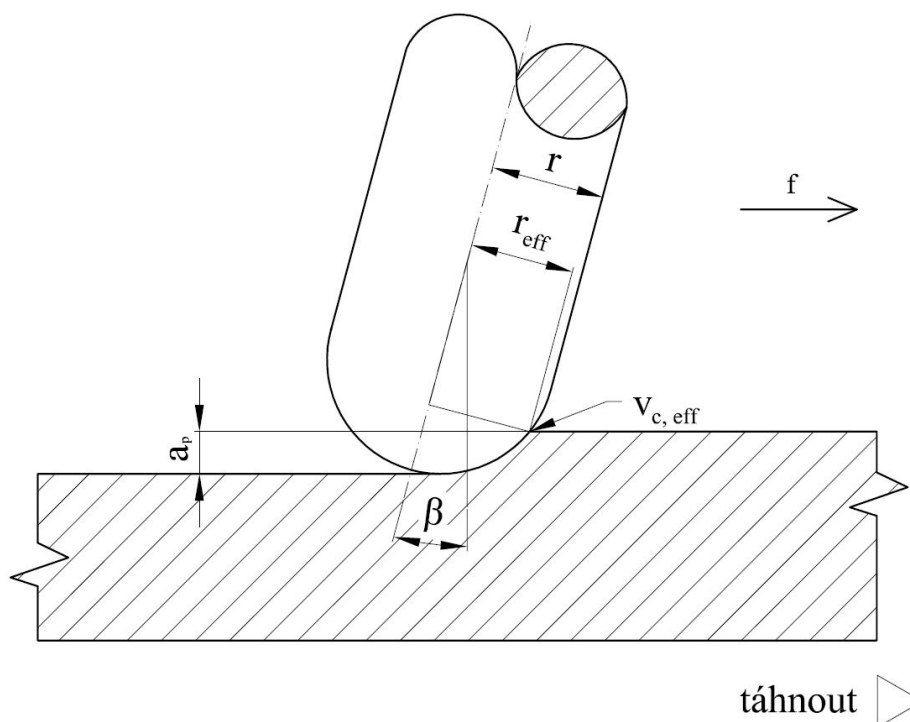


*Obr. 11 Multi-Axis Spiral Milling*

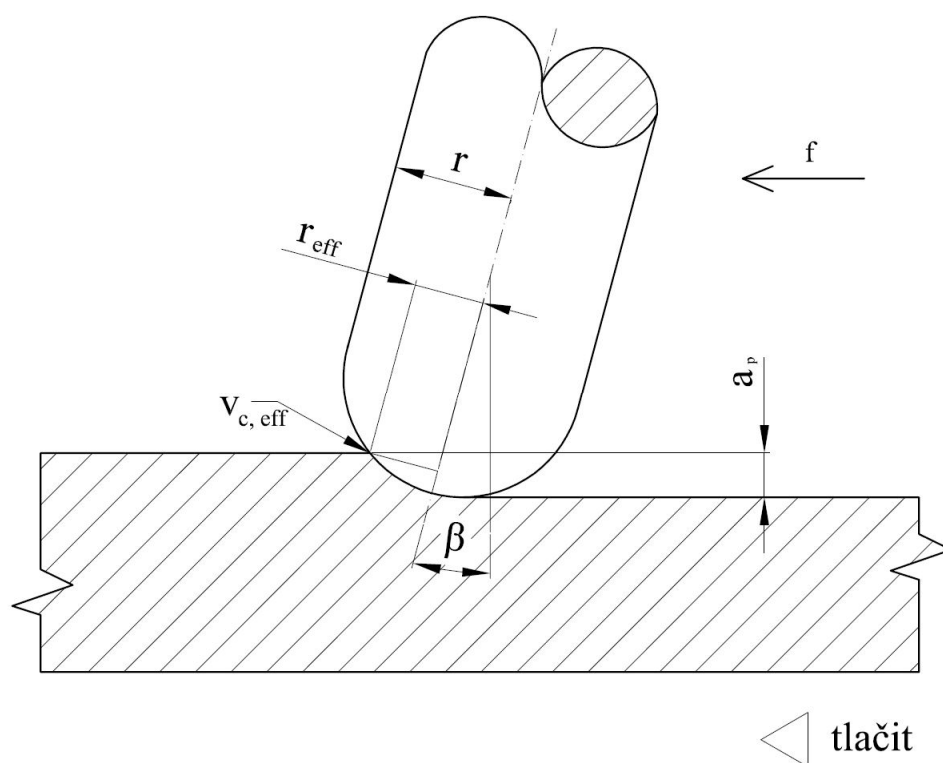
## 2.2 Strategie frézování při obrábění naklopeným nástrojem

Při frézování kulovými frézami standardním způsobem, kdy materiál a nástroj svírají pravý úhel, je na kulovém ostří v ose frézy nulová řezná rychlost. Díky tomu zde dochází k nežádoucím vlivům, jako je pěchování třísek, zvyšování teploty nebo tvorba nárůstku. Tyto jevy mají za následek zhoršení jakosti povrchu obráběného materiálu a snížení životnosti nástroje, případně jeho vyštípnutí. Zmíněné vlivy lze eliminovat naklopením nástroje [3].

Používá se úhel nastavení frézy mezi  $10^\circ$  až  $20^\circ$ , optimální bývá  $15^\circ$ . Kromě zvýšení skutečné řezné rychlosti (viz uvedený příklad) se zlepší i jakost povrchu a životnost nástroje. Velmi důležitý je též směr posuvu. Pokud je nástroj tažený, mají frézy tišší chod a zlepšuje se i povrch obráběného materiálu. Také použití sousledného frézování má na chod frézy a jakost povrchu velký vliv a zároveň zvyšuje životnost frézy [3].



Obr. 12 Tažený nástroj při naklopení kulové frézy



Obr. 13 Tlačený nástroj při naklopení kulové frézy

Výpočet efektivního poloměru frézy při frézování nástrojem tlačeným:

$$r_{eff} = r \times \sin \left[ \arcsin \left( \frac{r - a_p}{r} \right) - \beta \right] \text{ [mm]} \quad (1.1)$$

kde:  $a_p$  – axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm],

$\beta$  – úhel nastavení nástroje [°],

$r$  – poloměr frézy [mm],

$r_{eff}$  – skutečný (efektivní) rádius frézy [mm].

Výpočet efektivního poloměru frézy při frézování nástrojem taženým:

$$r_{eff} = r \times \sin \left[ \arccos \left( \frac{r - a_p}{r} \right) + \beta \right] \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

kde:  $a_p$  – axiální přísuv nástroje (hloubka řezu) [mm],

$\beta$  – úhel nastavení nástroje [°],

$r$  - poloměr frézy [mm],

$r_{eff}$  – skutečný (efektivní) rádius frézy [mm].

Výpočet efektivní řezné rychlosti:

$$v_{c,eff} = \frac{n \times \pi \times 2 \times r_{eff}}{1000} [m \cdot min^{-1}] \quad (1.3)$$

kde:  $r_{eff}$  – skutečný (efektivní) rádius frézy [mm],

$n$  – otáčky frézy [-],

$v_{c,eff}$  – skutečná (efektivní) řezná rychlost [ $m \times min^{-1}$ ].

### 3 ZHODNOCENÍ A ROZBOR OBRÁĚNÝCH PLOCH ZADANÉ SOUČÁSTI

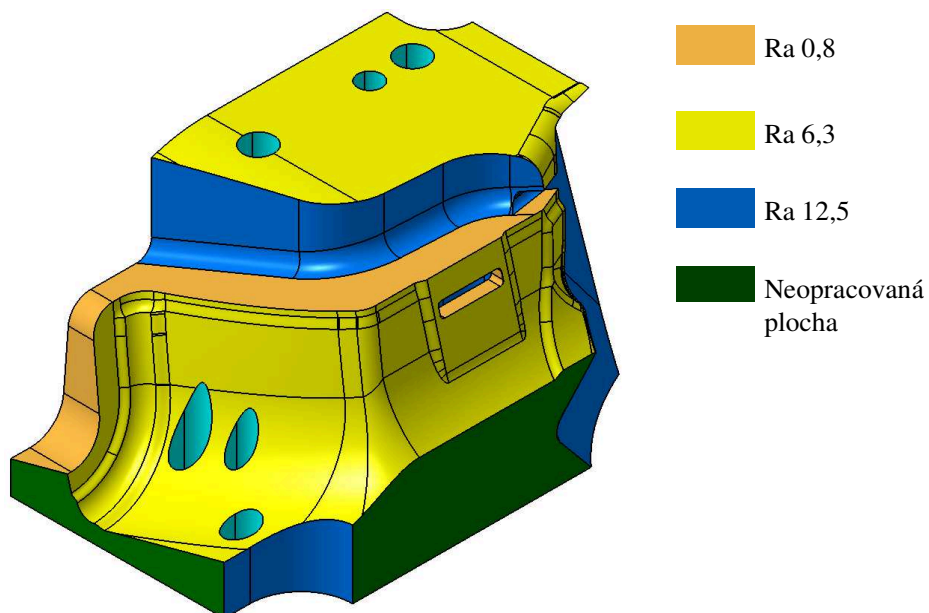
Tato práce poukazuje na důležitost výběru vhodné volby kombinace strategií pro dokončovací operace obrábění tvarových ploch. Vhodnou volbou je možné zkrátit výrobní časy a také zvýšit kvalitu obrobeneých ploch. Nejen vhodná volba strategie zkrátí výrobní časy a zvýší kvalitu obráběné plochy, ale důležitou roli také hraje optimální nastavení parametrů.

Pro tuto práci byla zvolena součást, která obsahuje více druhů tvarových ploch, na kterých lze aplikovat různé kombinace strategií opracování tvarových ploch. Součástí je střížná matrice na které je stříhán plastový díl. Matrice je z nástrojové oceli 1.2379. Matrice byla vyrobena v roce 2009, od té doby stříhala v nástroji a pro její opotřebení jí bylo nutné vyměnit. V tomto případě nebylo možné navaření hran a následného frézování, ale byla nutná celková výměna. Na základě toho se firma SWA s.r.o. rozhodla zjistit, kde by bylo možné ušetřit čas potřebná pro výrobu a tím snížit náklady a zvýšit produktivitu. Původní matrice byla programována v systému Tebis. Firma má rovněž zakoupený systém Catia V5R21 se kterým bylo zapotřebí porovnat původní systém Tebis. Z původní výroby byl zjištěn čas obrábění 47 minut (pouze dokončování).

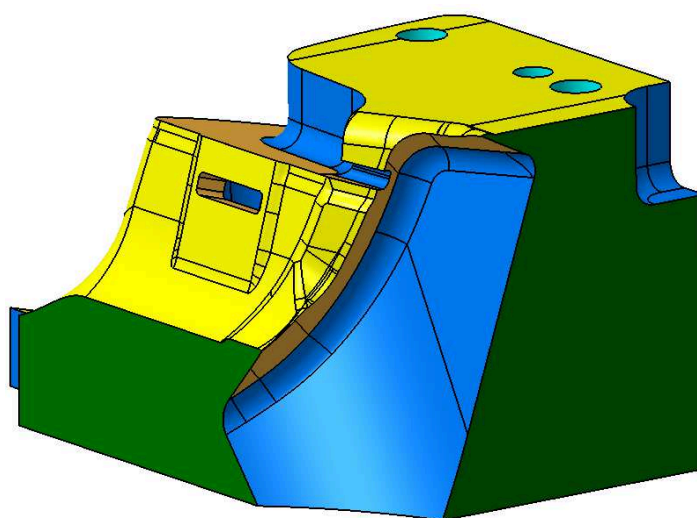
Matrice je barevně rozlišena podle účelu a kvality plochy:

- **Zlaté plochy** - touto barvou jsou vyznačeny střížné hrany na které dosedá razník. U těchto ploch je nutné dodržet maximální přesnost a drsnost ploch by neměla přesáhnout Ra 0,8.
- **Žluté plochy** - jsou plochy, na které dosedá plastový díl. Tyto plochy je nutné vyrobít přesně s drsností Ra 6,3. Pokud by tyto plochy byly vyrobeny s určitou nepřesností, tak by to mělo za následek špatné dosedání plastového dílu a stříh by byl posunut.
- **Modré plochy** - plochy, které slouží jako odlehčení. V některých případech u těchto ploch bude stačit hrubování. Orientační hodnota drsnosti je Ra 12,5.
- **Zelené plochy** - neopracované plochy

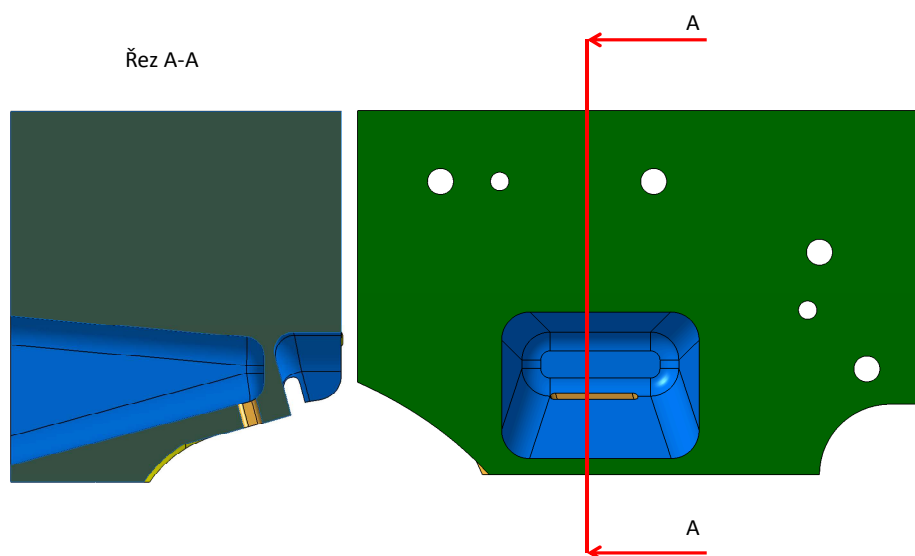
Matrice také obsahuje vrtané otvory pro šrouby a kolíky. Otvory jsou vyznačeny světlemodrou barvou. Tyto otvory nejsou podstatné pro tuto práci.



*Obr. 14 Střižná matrice (pohled zprava)*



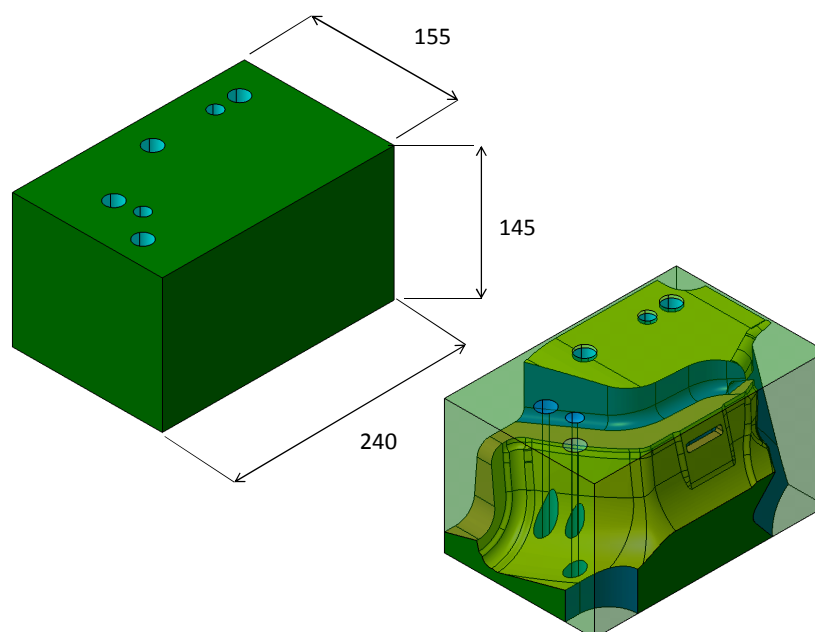
*Obr. 15 Střižná matrice (pohled zleva)*



*Obr. 16 Řez střížné matrice (pohled zdola)*

### **Polotovary:**

Polotovary obráběné matrice je o rozměrech 145 x 155 x 240 mm.



*Obr. 17 Polotovary střížné matrice*

V polotovaru budou před obráběním vyvrtány otvory pro šrouby a kolíky.



## 4 REALIZACE EXPERIMENTU

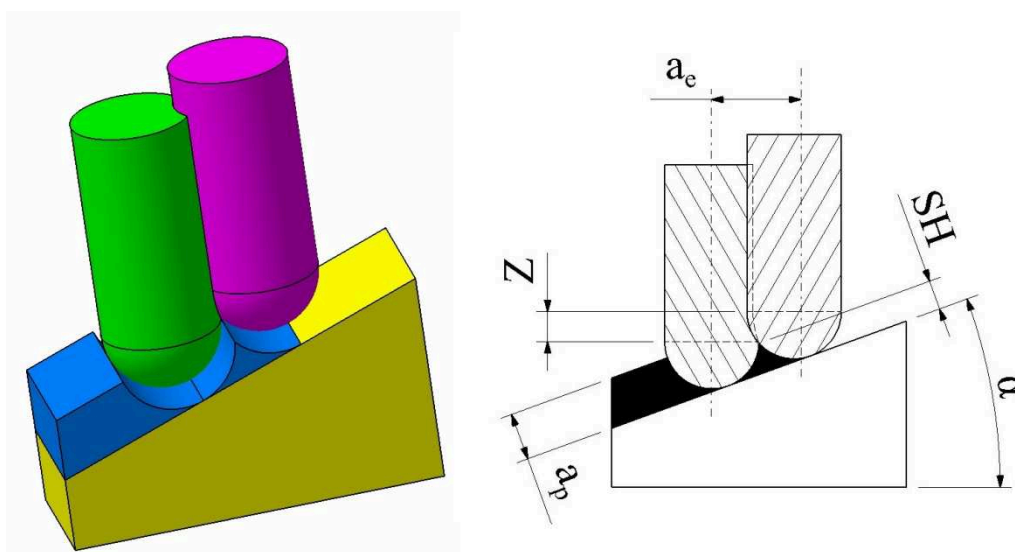
Byla vybrána střížná matrice, která je tvořena převážně z tvarových ploch, jež byly rozděleny do oblastí. Na tyto oblasti byly postupně aplikovány různé strategie, kde bylo důležité dosáhnout co nejkratšího času obrábění a jakost obráběného povrchu musela být zachována v požadované toleranci. Vše bude realizováno v CAD/CAM systémů Catia V5R21 pro 3osé frézování.

V experimentu budou aplikovány strategie pro dokončovací operace, součásti budou hrubovány s přídkem 0,3 mm. Práce se hrubováním nebude zabývat.

Parametry:

- šířka řezu  $a_e$
- hloubka řezu  $a_p$
- otáčky  $n$
- posuv  $f$
- posuv ve směru osy nástroje  $Z$
- řezná rychlost  $v_c$
- posuv na zub  $f_z$

Tyto parametry budou měněny u všech strategií tak, aby byla dodržena tolerance výšky zbytkového materiálu  $SH=(0-0,05)\text{mm}$ .



Obr. 18 SH (Scallop Height) – parametr nastavení výšky nerovnosti

Celkový stav obráběných ploch bude sledován pomocí funkce analýzy v daném programu, na kterém lze nastavit barevné rozlišení velikosti zbytkového materiálu, který nebyl opracován.

Vzhledem k tomu, že každý systém má jiné názvy strategií, bude zde pro přehlednost použito názvosloví z CAD/CAM systému Catia V5R21.

#### **4.1 Ověření použití vybraných strategií na tvarových plochách různými sklony**

Toto ověření bylo provedeno pro to, aby byla zjištěná vhodnost jednotlivé strategie pro na danou plochu s různými úhly náklonu. Byly zkonstruovány plochy s náklonem  $\alpha$  (10° až 80°), po 10°, všechny plochy mají shodnou plochu 120 cm<sup>2</sup>. Na tyto plochy byly postupně použity vybrané strategie a zjišťována jejich vhodnost na danou plochu.

Pro testování bylo zvoleno:

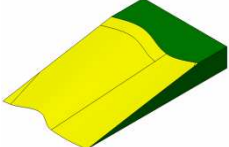
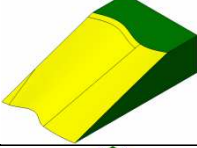

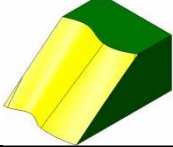
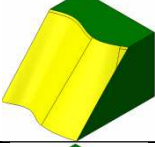
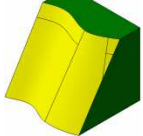
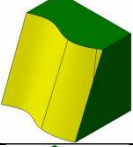
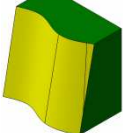
- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e$  podle (tabulky 1.)
- axiální posuv ve směru Z podle (tabulky 1.)

Pro tento účel byl vytvořen 3D model pro simulaci nastavení parametru výšky nerovnosti, obrázek 18. V tomto modelu byla nastavena hodnota SH 0,05mm, tato hodnota musel být ve všech případech shodná. Poté se postupně měnil úhel  $\alpha$  po 10° a v tomto modelu se automaticky měnila hodnota šířky řezu  $a_e$  a hodnota posunutí ve směru osy nástroje Z. Hodnoty byly odečteny z modelu pro každý úhel.

*Tab. 1 Naměřené parametry  $a_e$  a Z*

<b>úhel</b>	<b><math>a_e</math></b>	<b>Z</b>
<b>10°</b>	1,759	0,31
<b>20°</b>	1,678	0,611
<b>30°</b>	1,547	0,893
<b>40°</b>	1,368	1,148
<b>50°</b>	1,148	1,368
<b>60°</b>	0,893	1,547
<b>70°</b>	0,611	1,678
<b>80°</b>	0,31	1,759

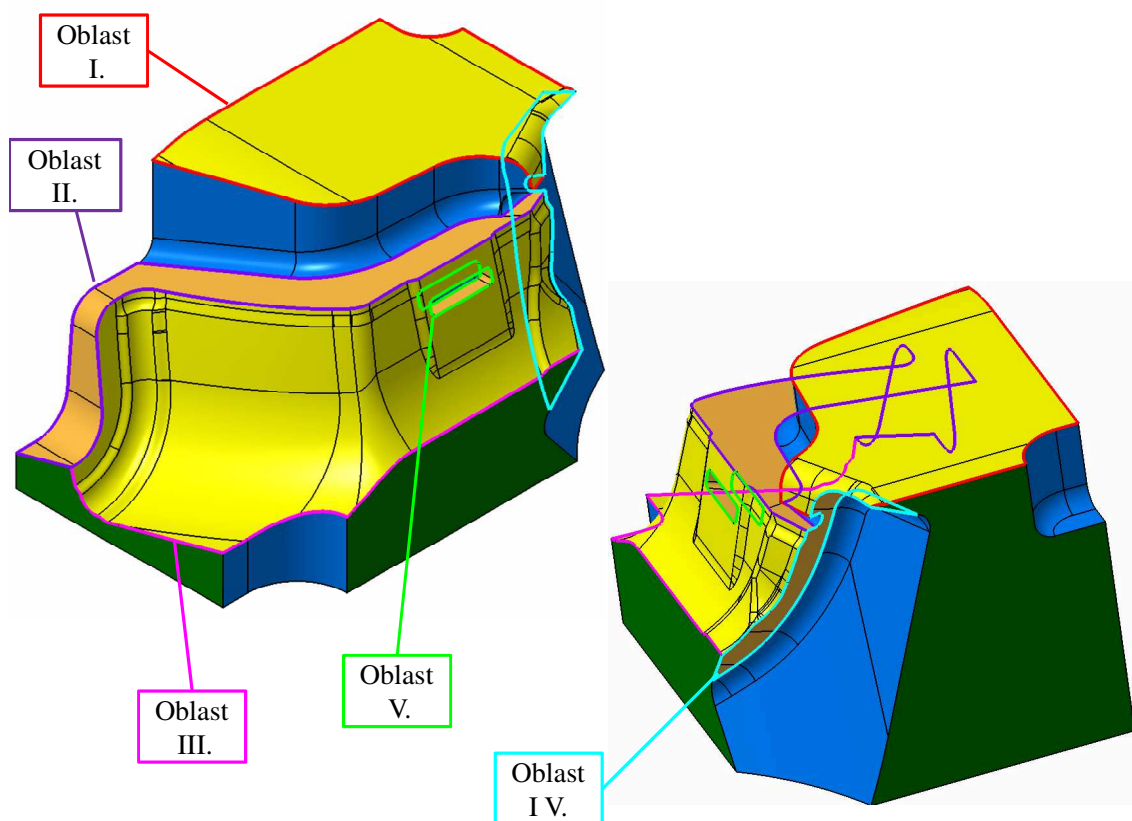
*Tab. 2 Přehled doby obrábění zadaných tvarových ploch jednotlivými strategiemi obrábění*

Úhel sklonu	Plocha	Čas obrábění zvolenou strategií			
		Z-Level	Sweeping	Contour-driven	Spiral Milling
10°		7:37	6:13	6:58	6:53
20°		7:49	7:46	7:33	7:36
30°		7:49	7:29	7:59	8:16
40°		7:51	7:45	8:05	-
50°		7:35	8:01	8:18	-
60°		7:48	9:08	8:25	-
70°		7:45	11:02	9:16	-
80°		7:50	17:43	10:21	-

Při tomto testování byla ve všech případech osa nástroje rovnoběžná s osou Z a nebyla nijak měněna. V tabulce 2. je přehled času opracování jednotlivých strategií pro plochy s různým nakloněním. Tato tabulka složí jako vodítko pro další testování.

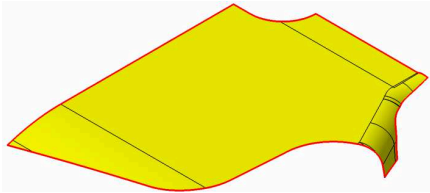
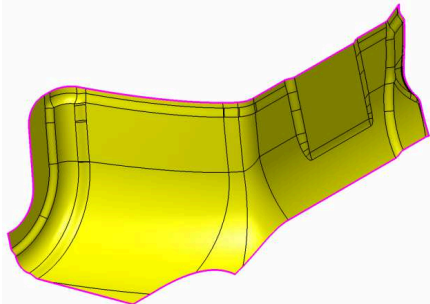
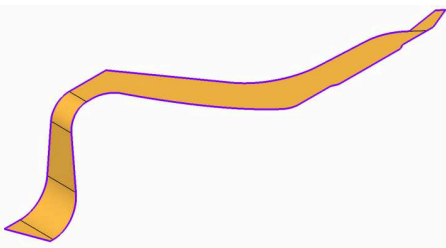

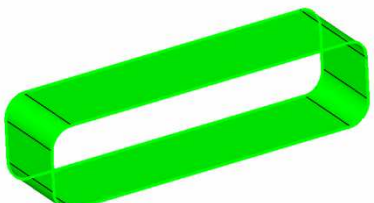
## 4.2 Rozdělení ploch

Plochy byly rozděleny do pěti oblastí tak, aby jednotlivé oblasti bylo možné obrábět na nejmenší počet strategií.



*Obr. 19 Rozdělení ploch součásti do oblastí*

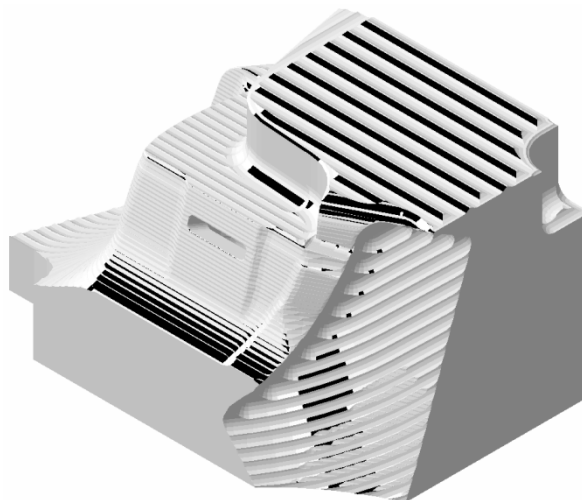
### 4.3 Schéma experimentu

Oblast	Tvarová ploch pro obrábění	Plocha (cm <sup>2</sup> )	Varianta	Použité strategie
I.		142	A	Spiral Milling + Contour-driven
			B	Sweeping
II.		233	A	Sweeping + Contour-driven
			B	Z-Level + Contour-driven
			C	Z-Level + Sweeping + Contour-driven
III.		81	A	Spiral Milling + Z-Level + Sweeping
			B	Spiral Milling + Z-Level + Z-Level
			C	Z-Level + Sweeping
IV.		26	A	Contour-driven
			B	Sweeping
			C	Z-Level
V.		9	A	Z-Level

Obr. 20 Schéma experiment

#### 4.4 Výchozí tvar vyhrubované součásti

Výchozí tvar vyhrubované součásti, minimální hodnota přídavku je 0,2 mm.

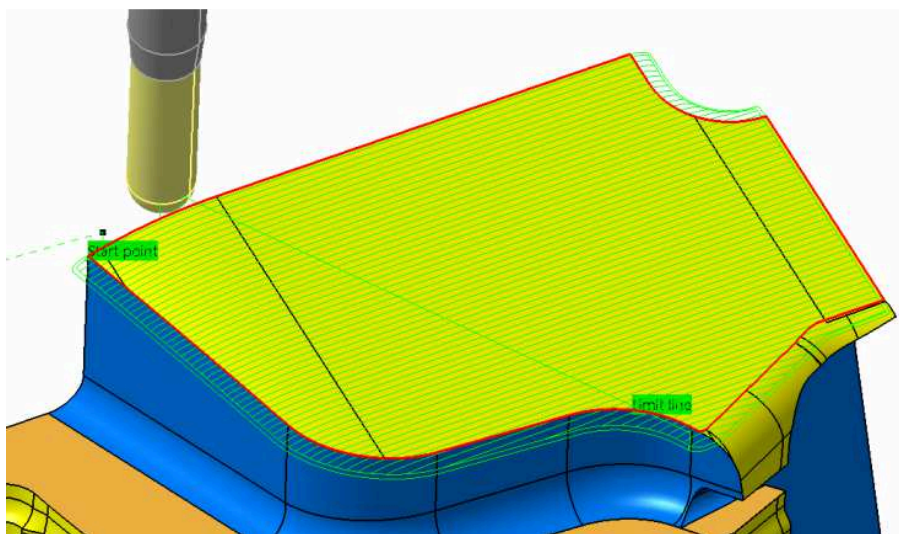


*Obr. 21 Výchozí tvar vyhrubované součásti*

#### 4.5 Opracování oblasti I.

##### **Oblast I. - varianta A - Spiral Milling + Contour-driven**

Pro dokončovací operaci oblasti I., jako první zvolená strategie byla Spiral Milling. Touto strategií byla obráběná pouze horní rovinná část. Hranice plochy jsou zobrazeny červenou čarou obr. 22. Dráhy nástroje tvoří řezy roviny ZX s opracovanou plochou o radiálním posuvu frézy, hodnota byla automaticky vygenerována programem, při zadání maximální hodnoty SH (parametr nastavení výšky nerovnosti) 0,05 mm.

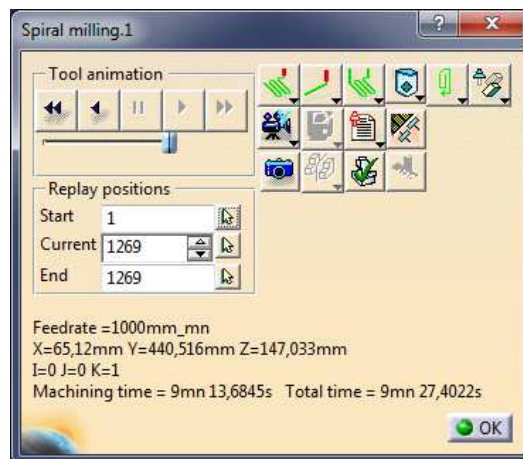


*Obr. 22 Zobrazení drah nástroje při obrábění strategií Spiral Milling*

**Zadané parametry: Spiral Milling**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1,8\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

Čas potřebný pro opracování plochy byl 9 min a 27 s. Tento čas byl automaticky vypočítán programem, pro optimální pracovní posuv zadaného nástroje.

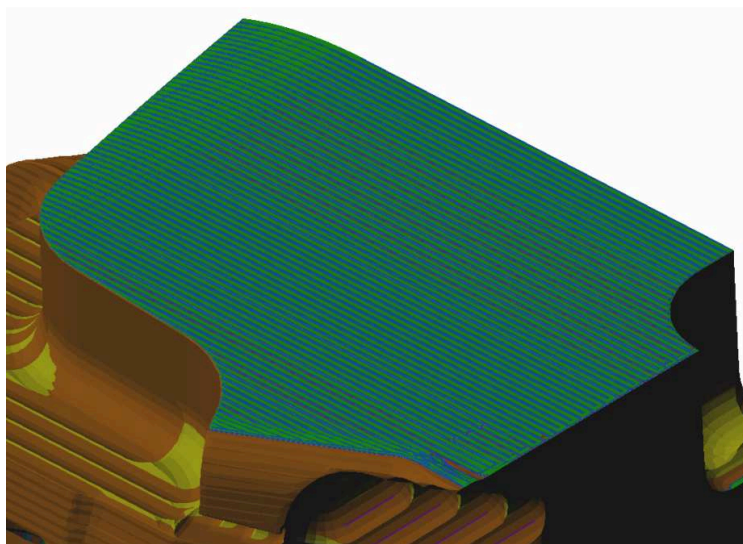


*Obr. 23 Čas obrábění strategie Spiral-Milling*

Při každém obrábění bude provedena analýza zbytkového materiálu, která barevně rozlišuje hodnoty zbytkového materiálu. Hodnoty byly nastaveny pro každé obrábění shodně tak, aby bylo možné porovnávat kvalitu obráběné plochy. Při překročení zadané tolerance  $+0,05\text{mm}$  musely být změněny parametry tak, aby kvalita plochy byla vyrobena v požadované kvalitě.

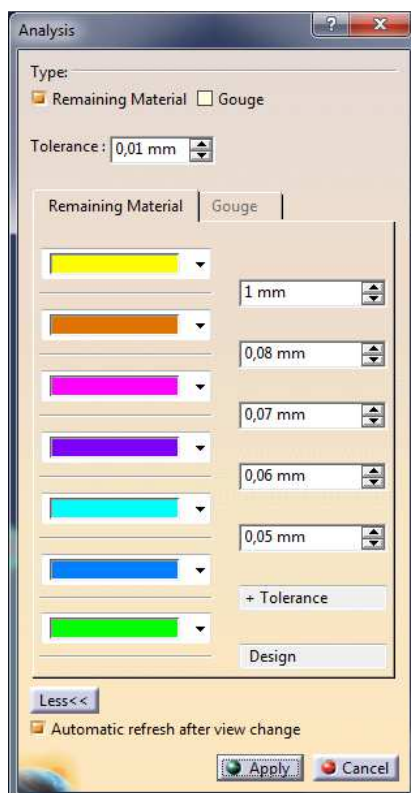
Analýza zbytkového materiálu obr. 24 prokázala, že kvalita obráběné plochy je v požadované toleranci.





Obr. 24 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Spiral-Milling

Porovnávací tabulka zbytkového materiálu obr. 25., v této tabulce byly nastaveny hodnoty zbytkového materiálu, každá hodnota je v analýze zobrazená jinou barvou. Pro tento experiment se hodnoty v tabulce nebudou měnit.

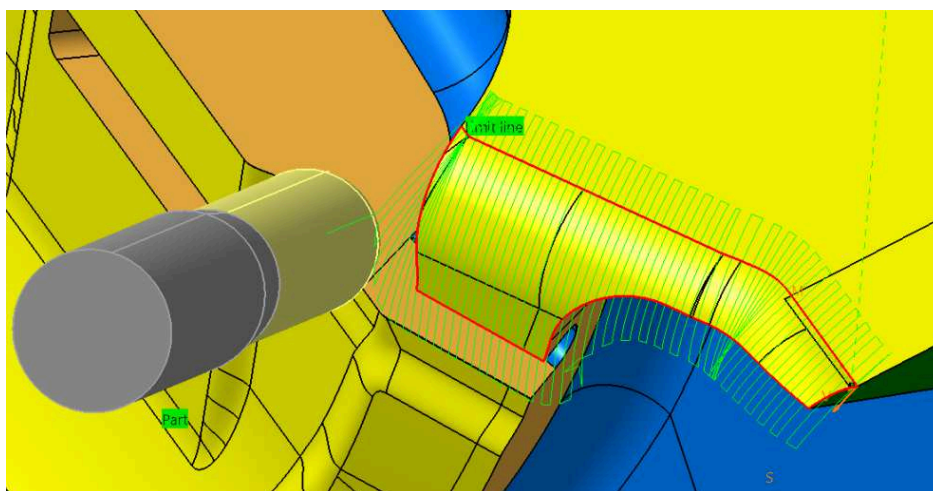


Obr. 25 Tabulka pro porovnání zbytkového materiálu

Druhá část plochy byla obráběná strategií Contour-driven, obráběná část plochy je ohraničená červenou čarou. U této strategie je nutno určit řídicí křivku. V tomto případě řídicí křivku tvoří horní hranice plochy. Dráhy nástroje tvoří kolmé řezy rovin s řídicí



křivkou. Bylo nezbytné osu nástroje natočit tak, aby nástroj byl schopen opracovat celou plochu.



Obr. 26 Zobrazení drah nástroje strategie Contour-driven

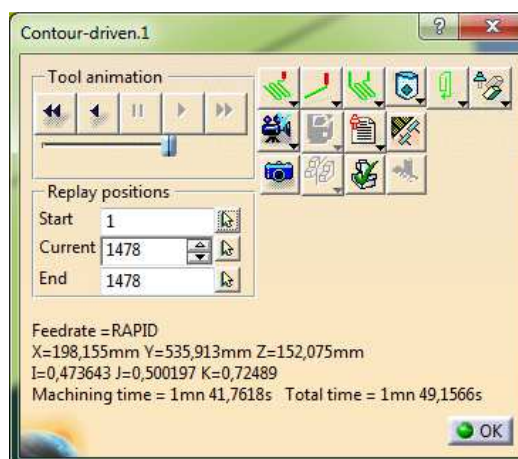
**Zadané parametry: Contour-driven**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1,8\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje:**

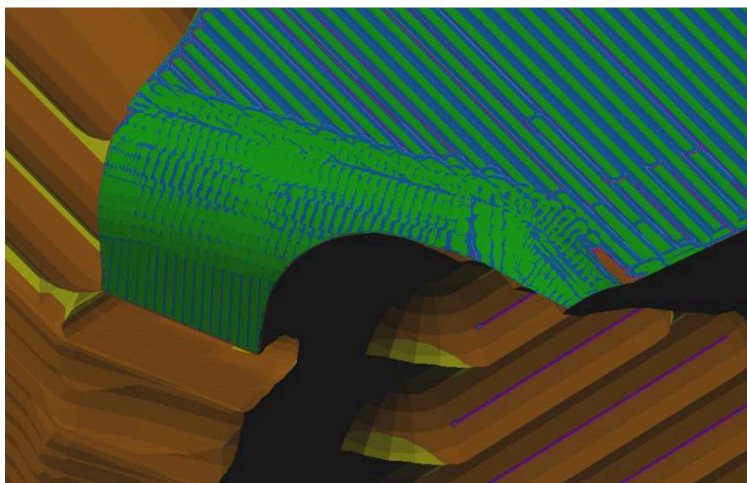
- úhel 1 od osy X =  $30^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $33^\circ$

Čas potřebný pro opracování plochy byl 1 min a 49 s.



*Obr. 27 Čas obrábění strategie Contour-driven*

Jak je vidět z analýzy zbytkového materiálu obr. 28 obráběná plocha je v dané toleranci, tudíž bylo dosaženo požadované kvality.

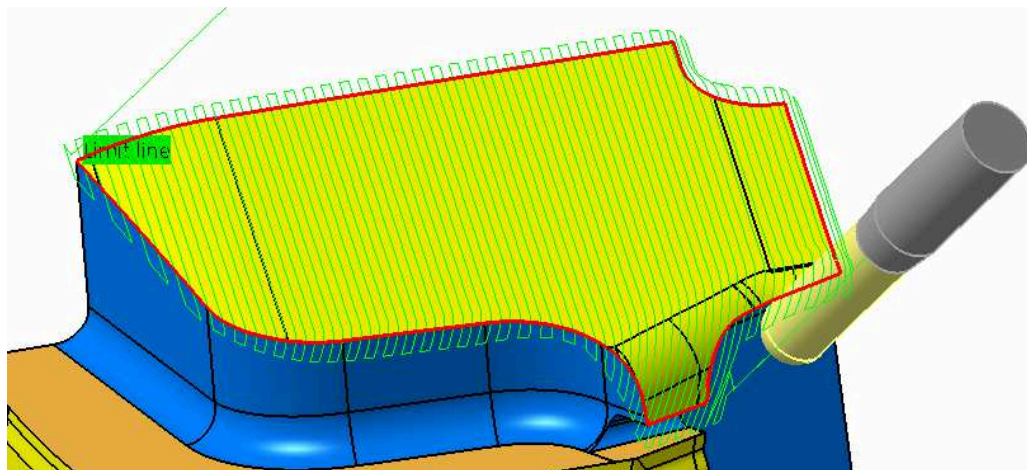


*Obr. 28 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Contour-driven*

Pro obrábění oblasti I. strategiemi Spiral Milling a Contour-driven bylo zapotřebí celkového času 11 min 16 s.

### **Oblast I. - varianta B - Sweeping**

Jako druhá varianta pro opracování oblasti I. byla zvolená strategie Sweeping. Dráhy nástroje jsou prováděny ve svislých rovnoběžných rovinách, v tomto případě je osa nástroje ve směru obrábění. Naklopení nástroje muselo být voleno tak, aby nebyly vytvořeny svislé plochy. Byla použita kulová fréza D16 mm, parametr nastavení výšky nerovnosti  $SH=0,05$  mm. Pro tyto hodnoty byl vygenerován optimální radiální posuv  $a_e=1.8$  mm. V tomto případě je možné obrábět celou oblast I. pouze jednou strategií.



Obr. 29 Zobrazení drah nástroje strategie Sweeping

**Zadané parametry: Sweeping**

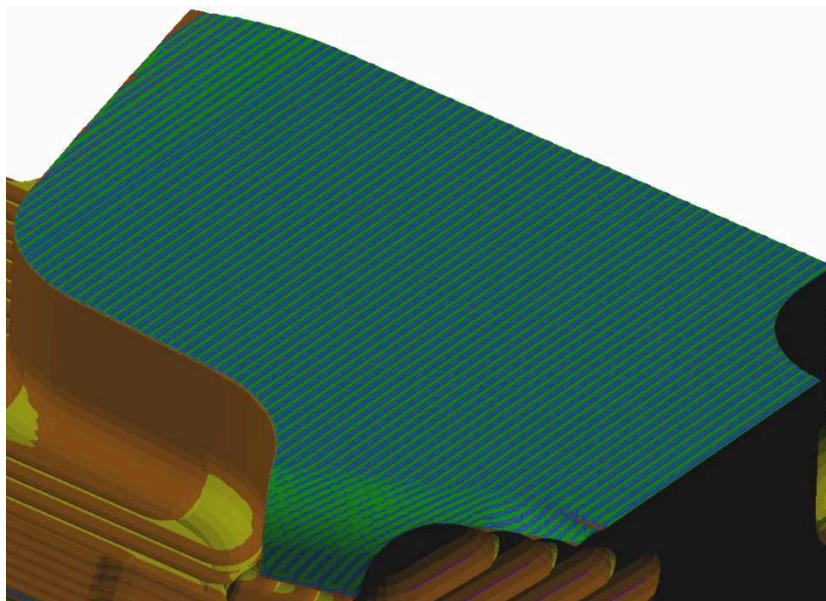
- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1,8\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $28,6^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $27,9^\circ$

Čas potřebný pro opracování plochy byl 8 min a 17 s.

Zbytková analýza materiálu obr. 30, z analýzy je vidět, že zbytkový materiál nepřesahuje danou toleranci.

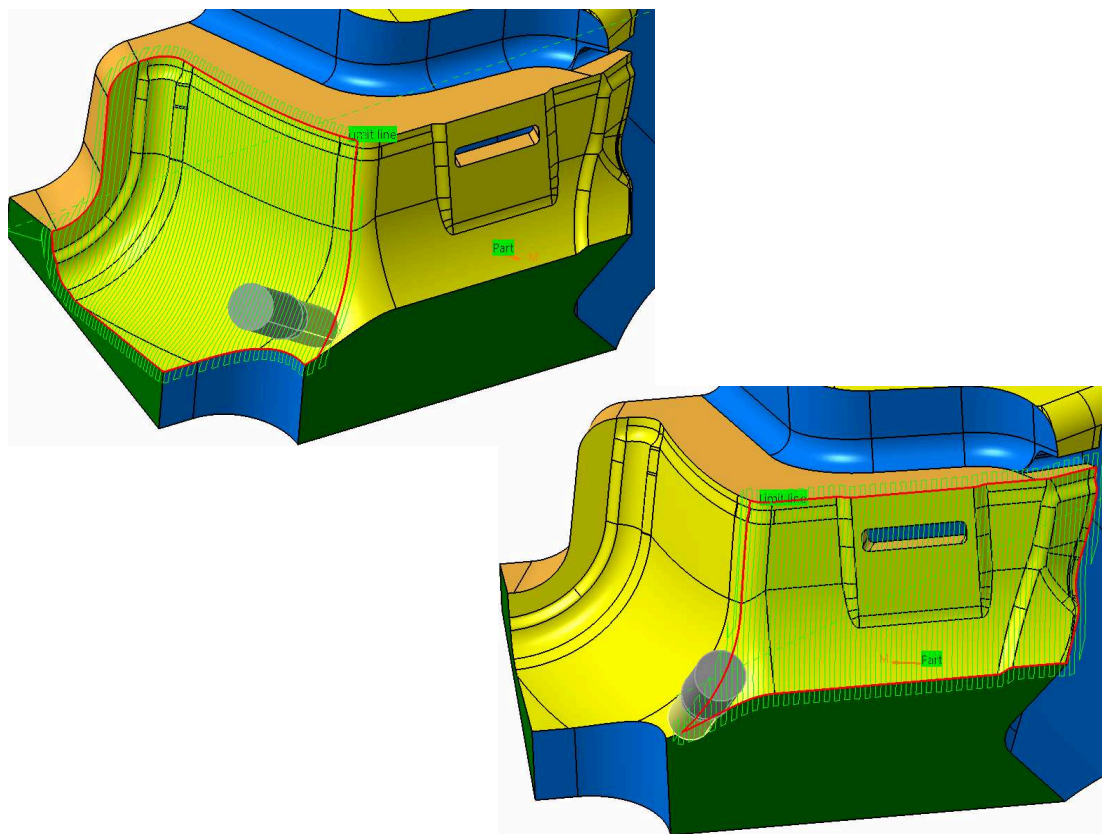


*Obr. 30 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping*

#### **4.6 Opracování oblasti II.**

##### **Oblast II. - varianta A - Sweeping + Contour-driven**

Pro oblast II. byla zvolena strategie Sweeping. Plocha byla rozdělena na dvě části tak, aby osa nástroje byla normálově k obráběné ploše. Hranice těchto částí jsou vyznačený červenou čarou obr. 31. Touto strategií není vhodné obrábět svislé plochy.



Obr. 31 Zobrazení drah nástroje strategie Sweeping, část 1. (vlevo), část 2. (vpravo)

**Zadané parametry:Sweeping**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1,8\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje 1:**

- úhel 1 od osy X =  $-37,3^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $33,3^\circ$

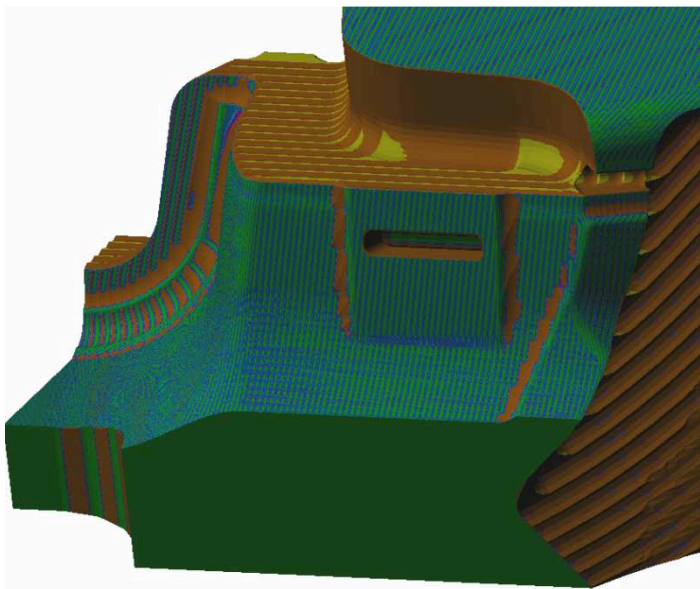
**Natočení osy nástroje 2:**

- úhel 1 od osy X =  $4^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $48,6^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Sweeping obou částí plochy byl 14 min 42 s.



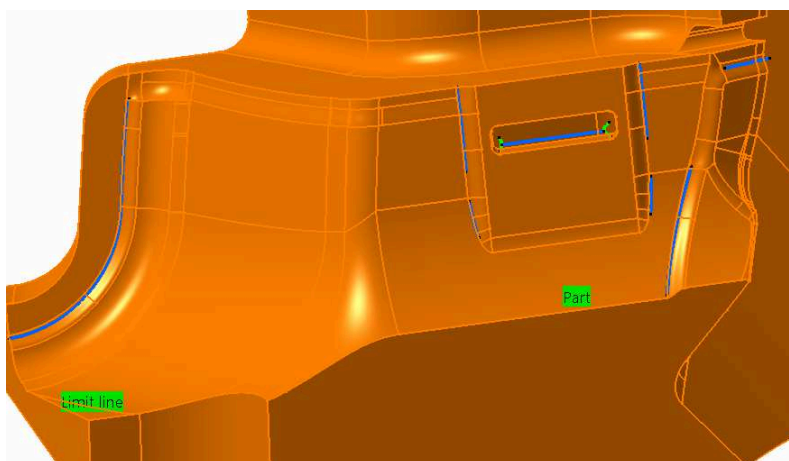
Při analýze zbytkového materiálu bylo zjištěno, že v některých oblastech nebyl odebrán všechnen materiál, což bylo zapříčiněno velkým poloměrem nástroje. Podle zobrazené barvy bylo v těchto oblastech více než 0,08 mm zbytkového materiálu.



*Obr. 32 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping*

### **Dobírání zbytkového materiálu**

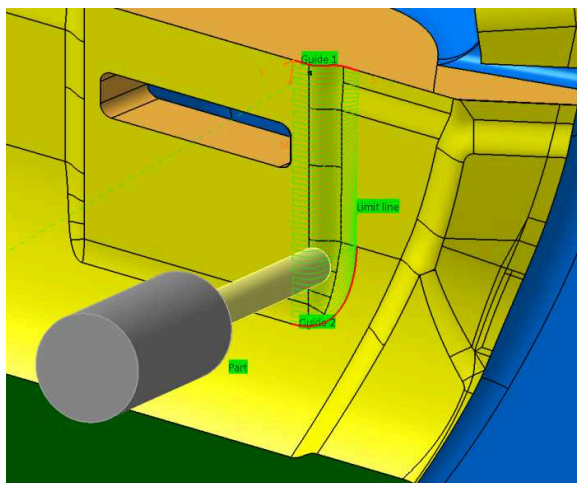
Program Catia obsahuje aplikaci, která dokáže analyzovat nedostatečně obrobené oblasti z předchozí operace. Tato aplikace určí nejvhodnější strategii a také zvolí ideální nástroj tak, aby dokázal opracovat nedostatečně obrobené plochy. Nedostatečně obrobenou oblast program označil modrou křivkou obr. 33.



*Obr. 33 Vyznačené oblasti, kde nástroj nedokázal odebrat materiál*

Programem Catia byla zvolena nejideálnější strategie Contour-driven, nástroj pro dobírání materiálu, kulová fréza D10 mm.

Na obrázku obrázků 34 je vidět strategie Contour-driven v jedné z nedostatečně obroběných oblastí.



Obr. 34 Dobírání materiálu strategii Contour-driven

**Zadané parametry: Contour-driven**

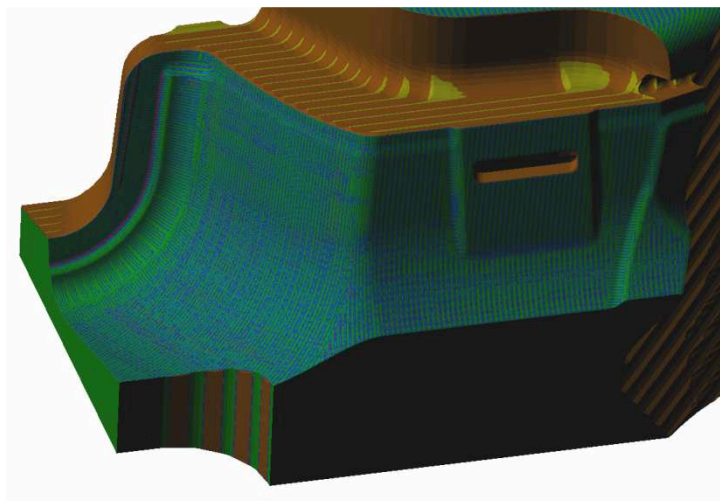
- Kulová fréza D10 mm
- otáčky  $n=6\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,200\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=188,5\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,1\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $8,9^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $59,6^\circ$

Čas potřebný pro dobírání materiálu v celé oblasti II. byl 6 min. 30 s..

Na obrázky analýzy č. 35 je vidět celá plocha oblasti II., že po opracování dosahuje požadované kvality.

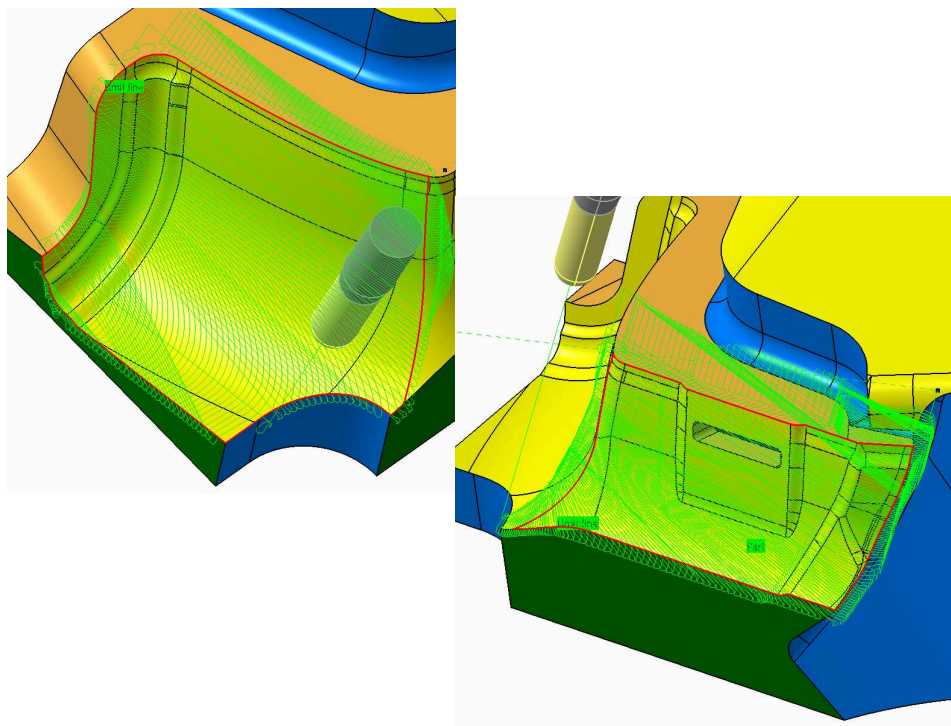


*Obr. 35 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping a dobráním malých poloměru strategií Contour-driven*

Celkový čas obrábění strategií Sweeping a následné dobírání materiálu strategií Contour-driven byl 21 min 12 s.

### **Oblast II. - varianta B - Z-Level + Contour-driven**

Pro opracování oblasti II. byla zvolena strategie Z-Level, a opět byla plocha rozdělená na dvě části. Dráhy strategie Z-Level jsou horizontály posunuty ve směru Z o danou hodnotu.



*Obr. 36 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level, část 1. (vlevo), část 2. (vpravo)*



**Zadané parametry: Z-Level**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- axiální posuv pro část 1.  $Z=1\text{ mm}$ , část 2.  $Z=0,8\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

***Natočení osy nástroje 1:***

- úhel 1 od osy X =  $-1,9^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $11,7^\circ$

***Natočení osy nástroje 2:***

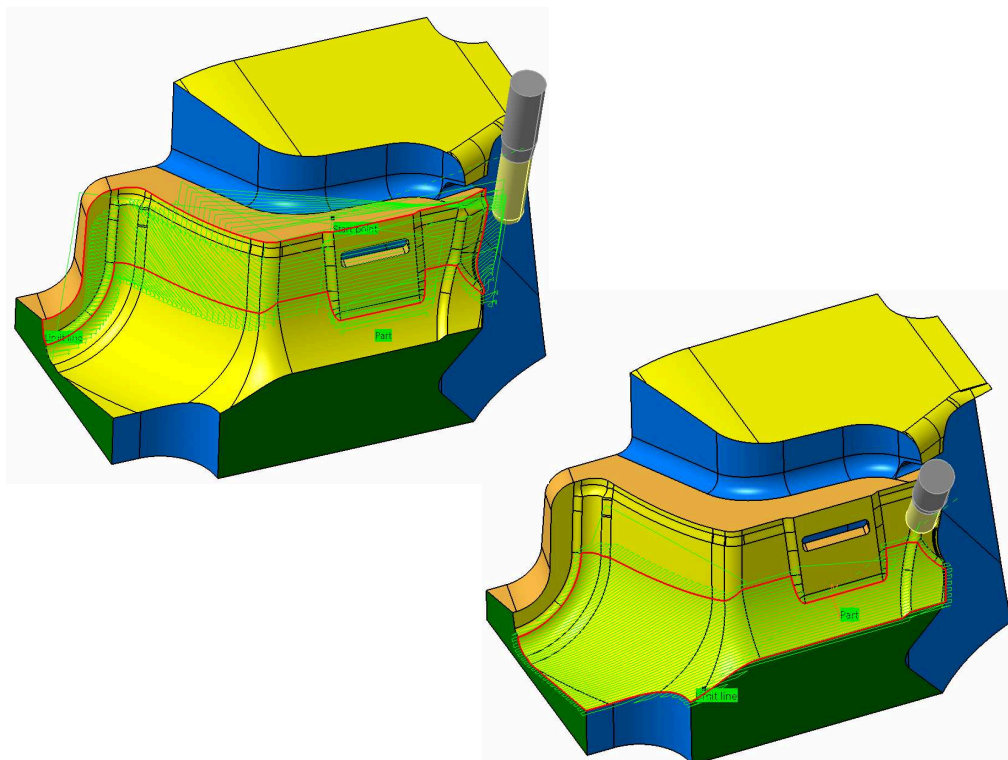
- úhel 1 od osy X =  $18^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $0,2^\circ$

Aby bylo dosaženo celkové požadované kvality obráběné plochy bylo nutné, zmenšovat hodnotu posuvu ve směru Z tak, aby bylo možné obrobit v požadované kvalitě i ty plochy, které nemají takové strmé klesání. Tímto se podstatně zvýšil čas potřebný pro obrábění daných ploch.

Čas potřebný pro obrábění oblasti II. strategií Z-Level, včetně následného dobírání materiálu byl 36 min.

**Oblast II. - varianta C - Z-Level + Sweeping + Contour-driven**

Jako další varianty pro tuto plochu byly zvoleny kombinace strategií Z-Level a Sweeping. Strategie Z-Level byla použita na strmou část plochy. Strategie Sweeping byla použita na zbývající část oblasti II.



Obr. 37 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level (vlevo) a Sweeping (vpravo)

**Zadané parametry: Sweeping, Z-Level**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- axiální posuv  $Z=1\text{ mm}$  pro strategií Z-Level
- šířka řezu  $a_e=1,5\text{ mm}$  pro strategií Sweeping
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

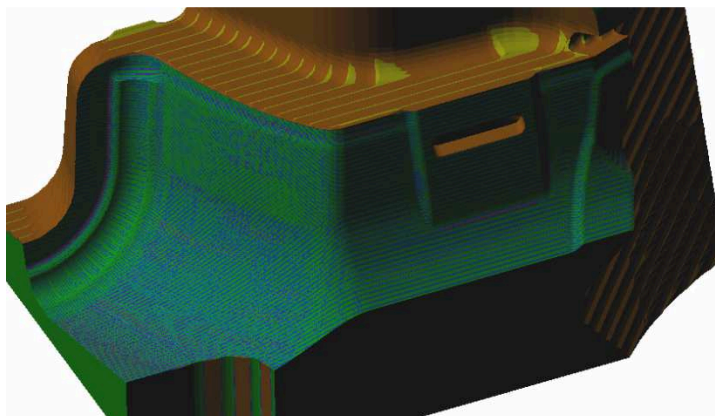
**Natočení osy nástroje 1:**

- úhel 1 od osy X =  $0,4^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $11,7^\circ$

**Natočení osy nástroje I:**

- úhel 1 od osy X =  $-9,5^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $38,5^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Z-level, Sweeping a následným dobíráním materiálu Contour-driven byl 24 min 12 s.



*Obr. 38 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Z-Level, Sweeping a dobráním malých poloměrů strategií Contour-driven*

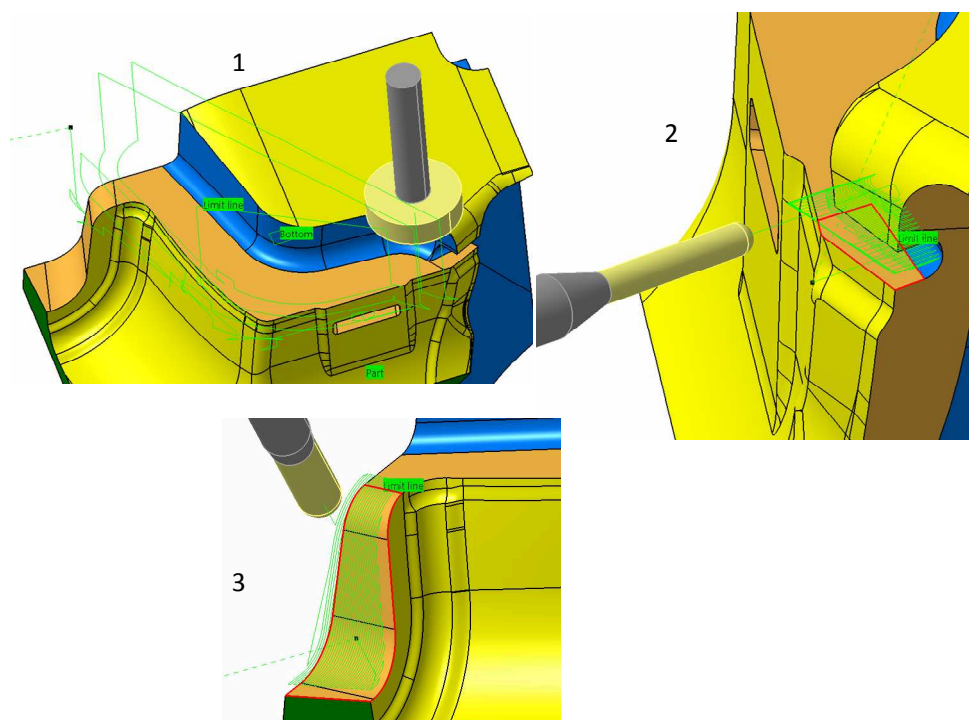
#### **4.7 Opracování oblasti III.**

##### **Oblast III. - varianta A - Spiral Milling + Z-Level + Sweeping**

K opracování oblasti III bylo využito strategie Spiral Milling, z důvodu využití rovinné plochy. Pro toto opracování byla použita maximální možná velikost nástroje, rovinná fréza D50 R2. Zde byl radiální posuv nástroje zvolen 10 mm.

Další část kterou bylo nutno opracovat, byla rovina, ke které byl omezený přístup. Jediná možná strategie se jevila Z-Level. Tato část byla opracovaná kulovou frézou D6. Nebyl zde možné použít větší nástroj. Axiální posuv ve směru Z byl zvolen 0,5 mm.

Poslední část této plochy byla obráběná strategií Sweeping. Zde byla volena osa nástroje tak, aby bylo možné opracovat celou plochu. Pro opracování byl dán nástroj kulová fréza D16 mm. Parametr nastavení výšky nerovnosti  $SH=0,05$  mm, šířka řezu  $a_e=1$  mm.



Obr. 39 Zobrazení drah nástroje strategie Spiral Milling (1), Z-Level (2), Sweeping (3)

**Zadané parametry: Spiral Milling**

- Rovinná fréza D50mm R2 mm
- otáčky  $n=1\ 100\ \text{ot} \times \text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=800\ \text{mm} \times \text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=10\ \text{mm}$
- řezná rychlost  $v_c=172,8\ \text{m} \times \text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,24\ \text{mm}$

**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $75^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $180^\circ$

**Zadané parametry: Z-Level**

- Kulová fréza D6 mm
- otáčky  $n=6\ 000\ \text{ot} \times \text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\ 000\ \text{mm} \times \text{min}^{-1}$
- axiální posuv  $Z=0,5\ \text{mm}$
- řezná rychlost  $v_c=113,1\ \text{m} \times \text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,08\ \text{mm}$

***Natočení osy nástroje:***

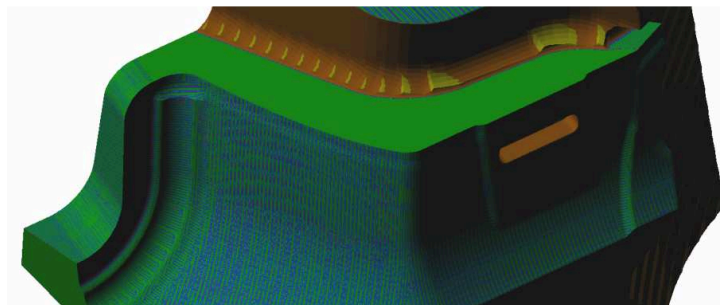
- úhel 1 od osy X =  $35,2^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $72,2^\circ$

**Zadané parametry: Sweeping**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

***Natočení osy nástroje:***

- úhel 1 od osy X =  $-39,2^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $2^\circ$



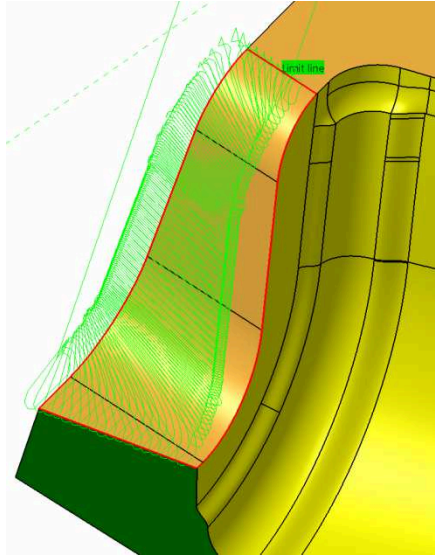
*Obr. 40 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Spiral Milling, Z-Level, Sweeping*

Čas potřebný pro obrábění strategií Spiral Milling, Z-Level a Sweeping byl 4 min 23 s.

Jak je vidět z analýzy zbytkového materiálu obr. 40 rovinná část, která byla opracována strategií Spiral Milling měla maximální přesnost obráběného povrchu.

**Oblast III. - varianta B - Spiral Milling + Z-Level + Z-Level**

Z předchozí zkoušky byly použity strategie pro obrábění rovinné části, byla zde nahrazena strategie Sweeping za Z-Level. Nástroj pro obrábění byla kulová fréza D16 mm. Krok nástroje ve směru Z byl 0,5 mm.



Obr. 41 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level

**Zadané parametry: Z-Level**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- axiální posuv  $Z=0,5\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $0^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $0^\circ$

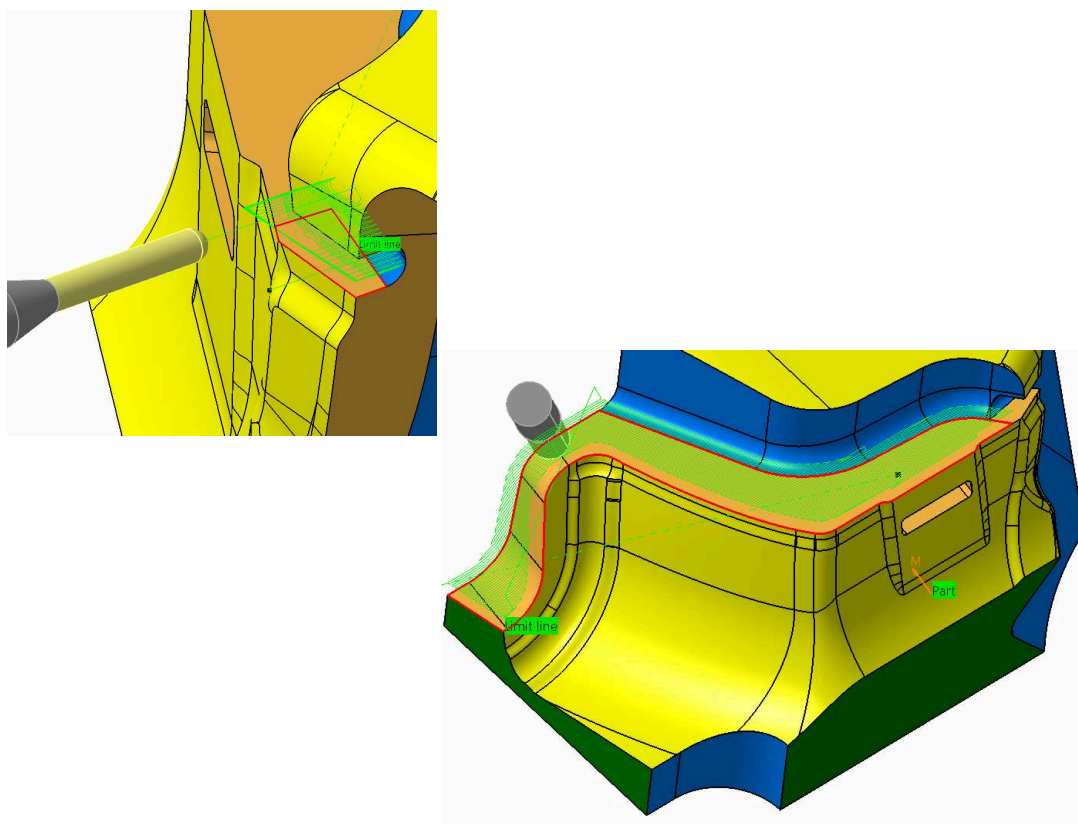
Čas potřebný pro obrábění strategií Spiral Milling, Z-Level a Z-level byl 8 min 26 s.

Prodloužení doby obrábění poslední strategií Z-Level mělo příčinu ve tvarech plochy. V horní části byla plocha dostatečně strmá pro danou strategii, spodní část byla mělká, tím vznikala velká nepřesnost a musel být upraven krok ve směru Z na menší hodnotu.

**Oblast III. - varianta C - Z-Level + Sweeping**

Další možnost byla kombinace strategie Z-Level a Sweeping, strategie Z-Level bude použita z předchozích zkoušek. Zbývající část plochy bude opracována strategií

Sweeping. Byl zvolen nástroj kulová fréza D16 mm. Radiální posuv nástroje  $a_e=1$  mm. Natočení nástroje bylo voleno tak, aby se nástroj bezproblémově dostal na celou plochu.



Obr. 42 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level, Sweeping

**Zadané parametry: Sweeping**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\ 000\ \text{ot} \times \text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\ 800\ \text{mm} \times \text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1$  mm
- řezná rychlost  $v_c=150,8\ \text{m} \times \text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3$  mm

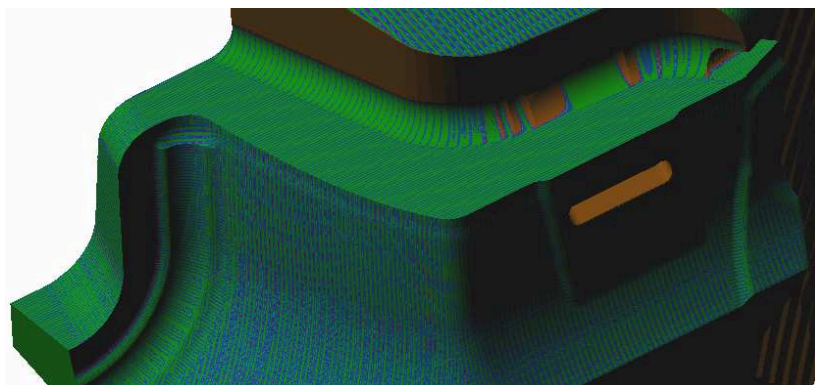
**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $-27,1^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $19,3^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Z-Level a Sweeping byl 7 min 45 s.



Na analýze zbytkového materiálu je vidět dosažená kvalita obrobené plochy obr. 42.

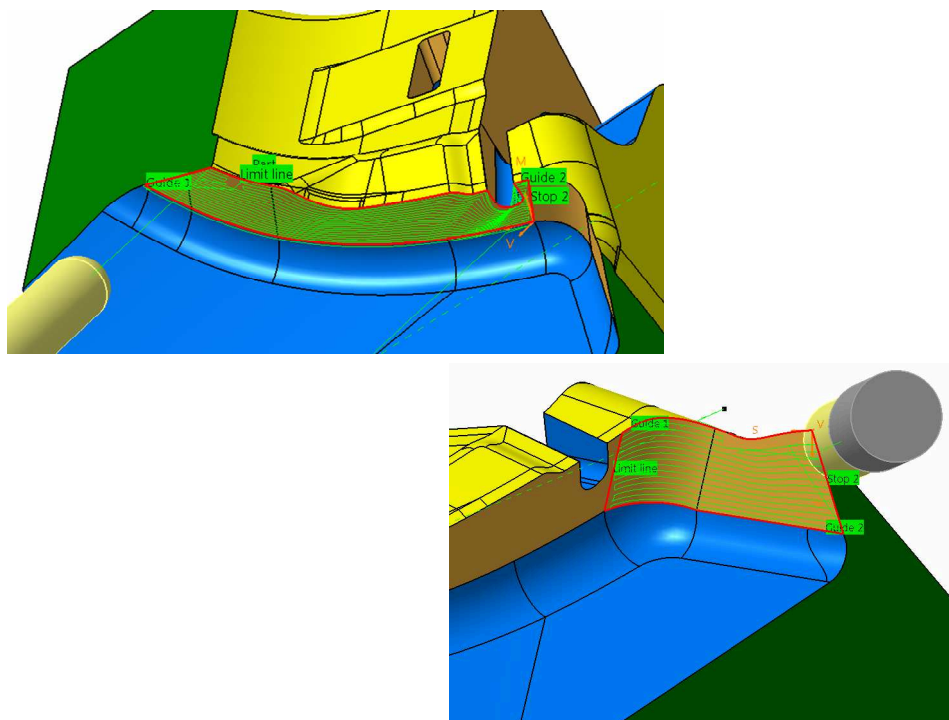


Obr. 43 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping, Z-Level

#### 4.8 Opracování oblasti IV.

##### Oblast IV. - varianta A - Contour-driven

Pro opracování oblasti IV byla zvolena strategie Contour-driven z důvodu jednoduchých ploch, na kterých bylo možné použít řídicí křivky. Oblast byla rozdělena na dvě části tak, aby byly vytvořeny dvě jednoduché plochy obr. 44 s jasnou hranicí a řídicí křivkou. Maximální krok nástroje v radiálním směru byl zadán na 1,5 mm.



Obr. 44 Zobrazení drah nástroje strategie Contour-driven



**Zadané parametry: Contour-driven**

- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=1,5\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

***Natočení osy nástroje 1:***

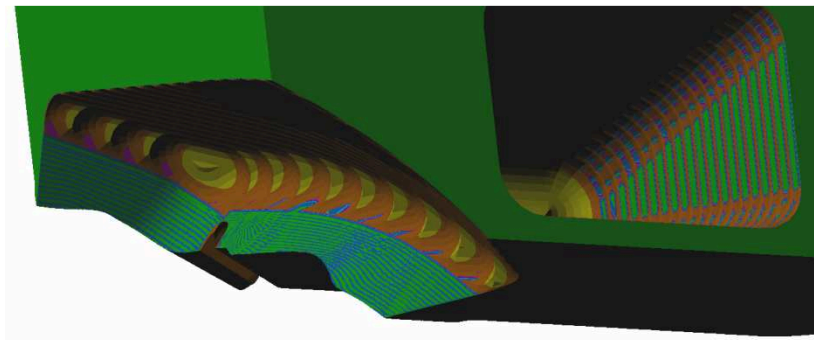
- úhel 1 od osy X =  $67,4^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $153,5^\circ$

***Natočení osy nástroje 2:***

- úhel 1 od osy X =  $56,4^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $133,9^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Z-Level a Sweeping byl 2 min 56 s.

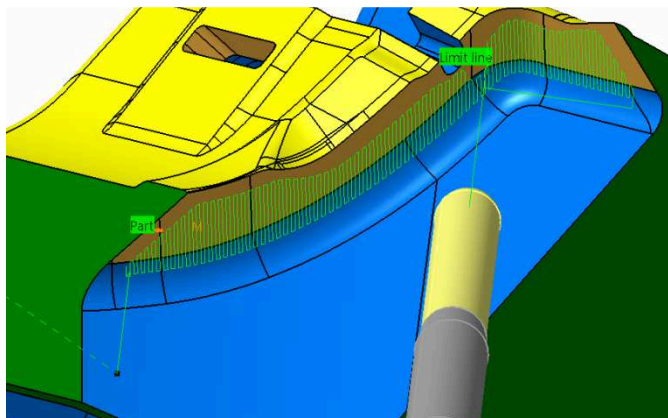
Výsledný povrch po obrábění strategií Contour-driven obr. 45.



*Obr. 45 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Contour-driven*

**Oblast IV. - varianta B - Sweeping**

Na oblast II byla použita strategie Sweeping. Zde bylo důležité najít optimální úhel natočení nástroje. Pro obrábění byla použita kulová fréza D16 mm. Parametr nastavení výšky nerovnosti  $SH=0,05\text{ mm}$ .



Obr. 46 Zobrazení drah nástroje strategie Sweeping

**Zadané parametry: Sweeping**

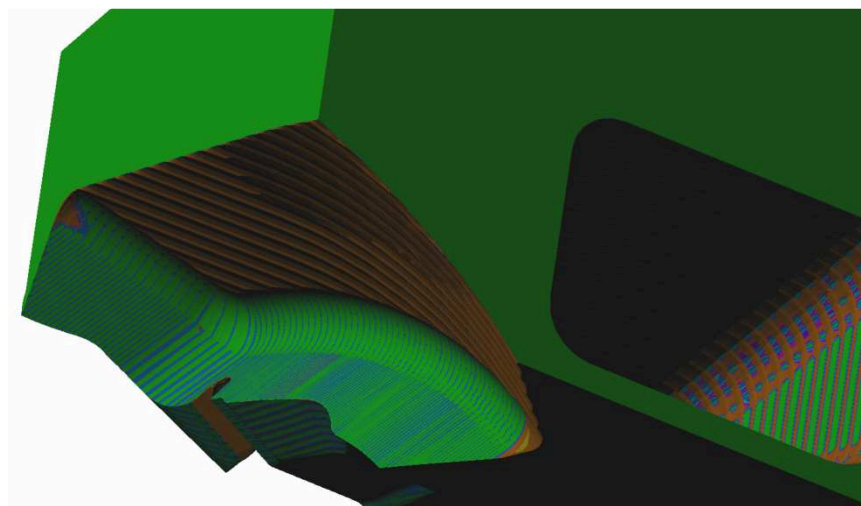
- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- šířka řezu  $a_e=0,9\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

**Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $53,4^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $144,7^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Sweeping byl 2 min 33 s.

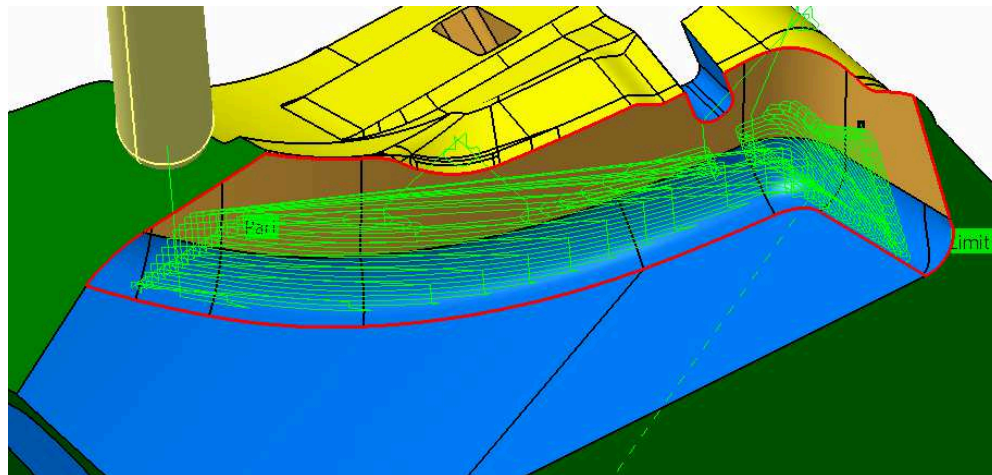
Výsledná analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping obr. 47.



Obr. 47 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Sweeping

#### **Oblast IV. - varianta C - Z-Level**

Při optimálním nastavení osy nástroje bylo vhodné použití strategie Z-Level, byla použita kulová fréza D16 mm. Axiální posuv v ose Z byl zvolen 1 mm.



*Obr. 48 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level*

#### **Zadané parametry: Z-Level**

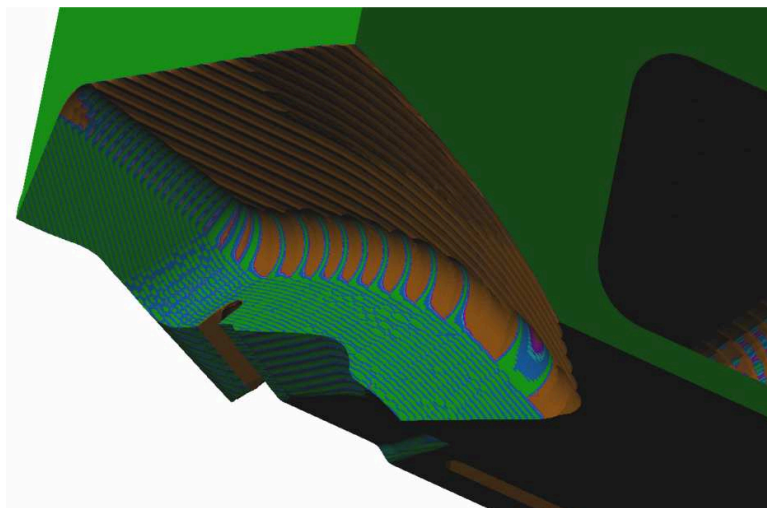
- Kulová fréza D16 mm
- otáčky  $n=3\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=1\,800\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- axiální posuv  $Z=1\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=150,8\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,3\text{ mm}$

#### **Natočení osy nástroje:**

- úhel 1 od osy X =  $51,8^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $68,5^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Z-Level byl 3 min 32 s.

Výsledná analýza zbytkového materiálu po obrábění strategií Z-Level obr. 49.

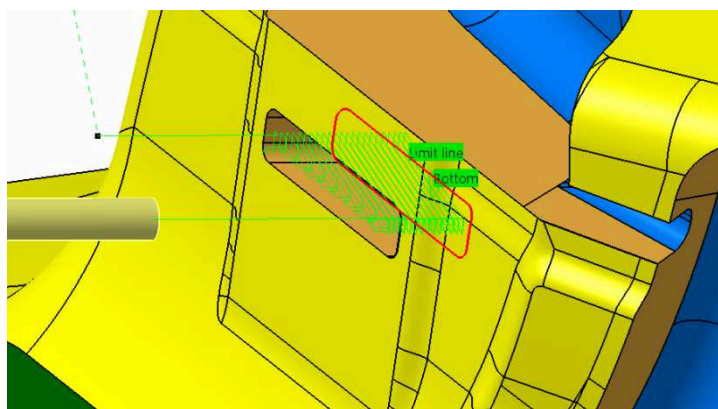


Obr. 49 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Z-Level

## 4.9 Opracování oblasti V.

### Oblast V. - varianta A - Z-Level

Oblast V byla opracována pouze jedinou možnou strategií Z-Level. Pro obrábění byl použit nástroj D4 mm a posuv ve směru Z byl dán 0,9 mm.



Obr. 50 Zobrazení drah nástroje strategie Z-Level

### Zadané parametry: Z-Level

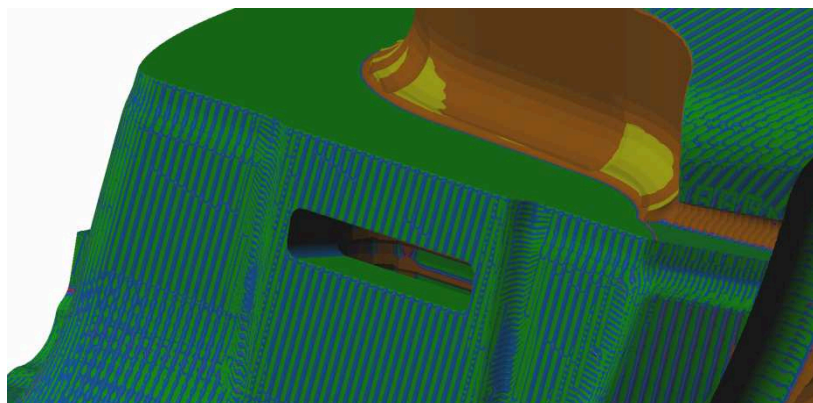
- Fréza D4 mm
- otáčky  $n=8\,000\text{ ot}\times\text{min}^{-1}$
- posuv nástroje  $f=600\text{ mm}\times\text{min}^{-1}$
- axiální posuv  $Z=0,9\text{ mm}$
- řezná rychlost  $v_c=105,5\text{ m}\times\text{min}^{-1}$
- posuv na zub  $f_z=0,04\text{ mm}$

***Natočení osy nástroje:***

- úhel 1 od osy X =  $-15^\circ$
- úhel 2 od osy Y =  $75^\circ$

Čas potřebný pro obrábění strategií Z-Level byl 1 min 44 s.

Analýza zbytkového materiálu oblast V. obr. 51.



*Obr. 51 Analýza zbytkového materiálu po opracování strategií Z-Level*

#### **4.10 Zhodnocení prostředí CAD/CAM Catia**

Tento systém nabízí programátorovi spoustu možností nastavení různých parametrů, včetně nápovědy s obrázky a postupy, které usnadňují orientaci. V systému chybí jakýsi ukazatel nastavení osy nástroje, který by dokázal osu natočit do ideální polohy tak, aby daná strategie byla optimální pro danou plochu. V některých případech bylo velmi problematické natočit nástroj do ideální polohy. Pokud nabyla zvolená optimální poloha nástroje, tak se nástroj nedostal na celou plochu a musel se následně volit jiný úhel natočení.

## 5 ZHODNOCENÍ A ROZBOR DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ NÁVRHU

V experimentu byly testovány různé strategie obrábění na tvarové plochy. Každá plocha musela mít požadovanou kvalitu povrch po opracování. Parametry daných strategií byly upravovány tak, aby tolerance po opracování byla +0,05 mm zbytkového materiálu.

### Celkové zobrazení času obrábění u jednotlivých strategií.

<b>Oblast I.</b>	Spiral Milling + Contour-driven	11 min 16 s
	Sweeping	<u>8 min 17 s</u>
<b>Oblast II.</b>	Sweeping + Contour-driven	<u>21 min 12 s</u>
	Z-Level + Contour-driven	36 min
	Z-Level + Sweeping + Contour-driven	24 min 12 s
<b>Oblast III.</b>	Spiral Milling + Z-Level + Sweeping	<u>4 min 23 s</u>
	Spiral Milling + Z-Level + Z-Level	8 min 26 s
	Z-Level + Sweeping	7 min 54 s
<b>Oblast III.</b>	Contour-driven	2 min 56 s
	Sweeping	<u>2 min 33 s</u>
	Z-Level	3 min 32 s
<b>Oblast III.</b>	Z-Level	<u>1 min 44 s</u>

Z časových údajů je patrné, že použití optimální strategie pro opracování tvarové plochy je velmi důležité z důvodu úspory času, která má obrovský vliv na produktivitu obrábění.

Při současné ceně frézky cca. 1500 Kč/h je možné ušetřit spousta zbytečných nákladů. Při sečtení ideálních variant (nejkratších časů obrábění) byl výsledný čas 38 minut, a náklady na frézku by vycházely 950 Kč. Při sečtení nejhorších variant (nejdelších časů obrábění) byl výsledný čas 59 minut, náklady by vyšly na 1475 Kč. Touto variantou by se náklady navýšily o 525 Kč.

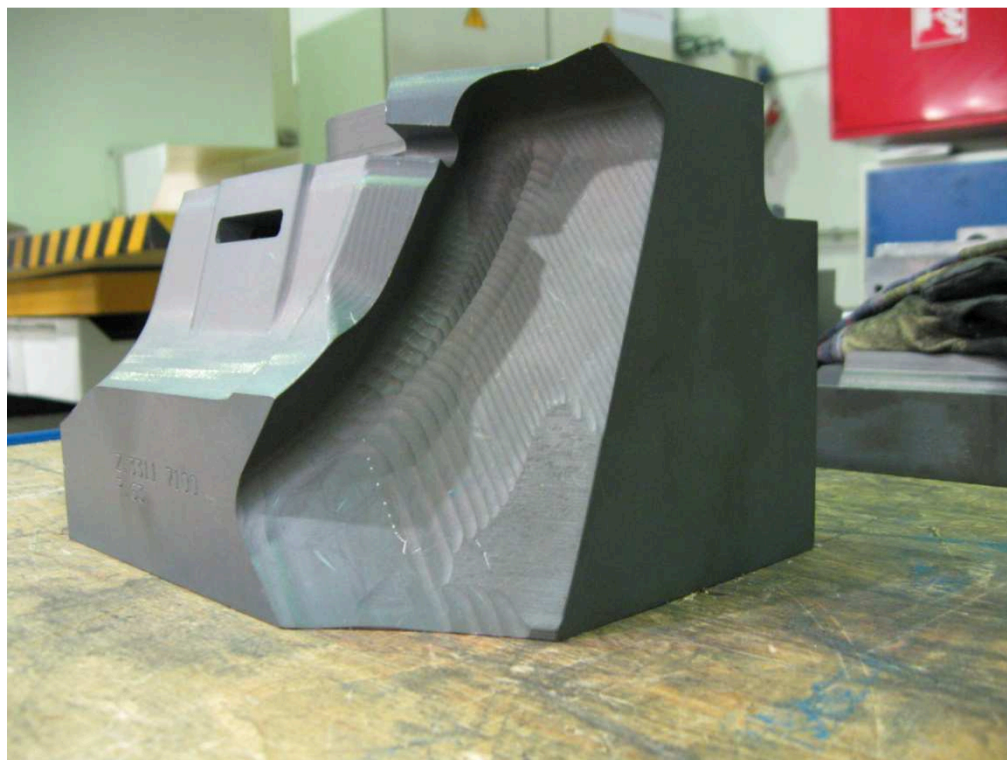
Při porovnání s původní variantou, kdy se tvarové plochy obráběly 47 minut a nově docílenou variantou 38 minut je časová úspora 9 minut. Tím bylo docíleno nepatrného navýšení produktivity.



## 5.1 Výsledný tvar po opracování



*Obr. 52 Výsledný tvar střižné matrice*



*Obr. 53 Výsledný tvar střižné matrice*

## 6 ZÁVĚR

Použité strategie mají velký vliv na výsledky obrábění ale i na ekonomické aspekty výroby. Výběrem vhodné strategie obrábění je možné snížit výrobní časy a ovlivnit kvalitu obráběných ploch.

V experimentu této práce bylo úkolem ověřit vliv volby optimální strategie frézování tvarových ploch na produktivitu práce. Na reálné součásti byly následně testovány různé strategie obrábění tvarových ploch. U všech ploch musela být dodržena odpovídající tolerance zbytkového materiálu. Tyto tolerance byly zjišťovány pomocí funkce „Analýza zbytkového materiálu“. Tato analýza dokáže barevně rozlišit vrstvu nepracovaného materiálu. Pokud nebyla plocha po obrábění danou strategií v odpovídající toleranci, bylo nutné provést korekci parametrů obrábění tak, aby bylo dosaženo odpovídající kvality. Pokud i po korekci parametrů neodpovídala požadované kvalitě, bylo od této strategie upuštěno, nebo byla nahrazená jinou strategií. Programem byly prováděny simulace obrábění, které určily dobu nezbytnou pro obrábění. Tyto časy byly následně vyhodnocovány.

Moderní CAD/CAM systémy dokážou pomocí jediné aplikace vyhodnotit tvarovou plochu a následně určit nejvhodnější strategii obrábění. V této oblasti by programátor měl mít dostatečné znalosti nabízených strategií v daném systému. Při této práci bylo nutné dokonale znát prostředí daného systému, z důvodu mnoha důležitých funkcí a přepínačů, které slouží k ideálnímu nastavení parametrů a možného zkrácení času obrábění vedoucí k vyšší produktivitě.

Uvedené výsledky a závěry jsou jakýmsi vodítkem pro CAD/CAM technology programátory vytvářející NC programy pro frézování tvarových ploch.



## 7 LITERATURA

- [1] SADÍLEK, Marek. *Vyspělé strategie ve 3D frézování*. MM Průmyslové spektrum, 2004, č. 12, s. 46,47 ISSN 1212-2572
- [2] SolidCAM [online]. 2009 [cit. 2010-05-02]. HSM obráběcí strategie. Dostupné z WWW: <<http://www.solidcam.cz/article.asp?nDepartmentID=7&nArticleID=92&nLanguageID=1>>.
- [3] JASPAR, Jiří. *Nové hvězdy mezi frézami pro nástrojárny a výrobce forem*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č. 05, s. 46. ISSN 1212-2572.
- [4] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘSKOVSKÁ, L. *Technologie II 1.díl*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007. 119 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 1641 - 8
- [5] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘSKOVSKÁ, L. *Technologie II 2.díl*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. 142 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 1822 - 1
- [6] SADÍLEK, Marek. *CAM systémy v obrábění I*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. 145 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 1821 - 4
- [7] FABIÁN, Michal; KAŤUCH, Peter; KOVÁČ, Jozef. *Vliv nastavení parametrů CAM na kvalitu povrchu frézované rovinné plochy* [online]. 2009 [cit. 2010-04-18]. CAD.CZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1402-vliv-nastaveni-parametru-cam-na-kvalitu-povrchu-frezovane-rovinne-plochy.html>>.
- [8] FABIÁN, Michal. *Optimalizace frézování dutiny formy* [online]. 2009 [cit. 2010-03-14]. CAD.CZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/1444-optimalizace-frezovani-dutiny-formy.html>>.
- [9] CIMR, Ivan. *Speciální modul pro obrábění tvarových ploch*. MM Průmyslové spektrum, 2010, č. 6, s. 52
- [10] DYTRON.CZ [online]. 2009 [cit. 2010-05-01]. CATIA V5. Dostupné z WWW: <<http://www.dytron.cz/catia-popis/catia-v5.aspx>>.
- [11] MARTYNEK, Radek. *Strategie opracování tvarových ploch*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010.

- [12] CAM systémy a výroba tvarových ploch. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2321-cam-systemy-a-vyroba-tvarovych-ploch.html>
  
- [13] CAM systémy a hodnocení strategií obrábění. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/2385-cam-systemy-a-hodnoceni-strategii-obrabeni.html>

## **8 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha A - Rozměrový protokol